Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

9

2015

Главный редактор
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЛЕГИЯ:

Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Лутовинина О.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г. за № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"

Адрес редакции:
107076, Москва,
Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (499) 268-38-58.
Факс: (499) 269-48-97.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2015

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Аверьянов Е.В., Арфикян С.А., Градецкий В.Г., Чередникова А.Е. Исследование мобильного робота вертикального перемещения на основе пневмопривода с многоступенчатым торможением 3

Коркмазов Ш.Х. Математические модели в задачах оперативного управления автоматизированными станочными системами 8

Шевцов А.А., Дранников А.В., Муравьёв А.С. Управление энергоэффективной технологией получения порошкообразного продукта из фильтрата спиртовой барды 10

Кузьмин В.В., Калякулин С.Ю. Этапы преобразования информации при автоматизированном расчёте параметров технологических процессов 13

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Лукьянова Н.В. Модульный метод моделирования с использованием разложения Винера 17

Бурков И.А., Пушкарёв А.В., Шакуров А.В., Цыганов Д.И. Исследование температурного распределения на рабочей поверхности малоинвазивного криозонда 23

Шибанов Г.П. Современные технологии проведения обликовых исследований 26

Цапко И.В., Власов А.В. Выделение объектов на изображениях методом поиска границ регионов 33

Хусаинова Г.Я. Моделирование процесса очистки пористой среды растворителями 39

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Иванов А.П., Пыченкова О.С. Разработка шкалы социального рейтинга банков. 44

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Averyanov E.V., Arfikyan S.A., Gradetskiy V.G., Cherednikova A.E. Research of the vertical moving robot on the grounds of pneumatic actuator with a multistage braking 3

Korkmazov Sh.Kh. Mathematical models in the operational control tasks of the automatic machine tool systems 8

Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Muravev A.S. Management of energy-efficient technology producing a powdery product from the filtrate spirit bards 10

Kuzmin V.V., Kalyakulin S.Yu. Information transformation stages at automatic computation of the technological process parameters 13

MODERN INFORMATION TECHNOLOGY

Lukyanova N.V. The modular modeling method by using the Wiener decomposition 17

Burkov I.A., Pushkarev A.V., Shakurov A.V., Tsyganov D.I. The research of the temperature distribution on the working surface of minimally invasive cryoprobe 23

Shibanov G.P. Modern technologies of shape research 26

Tsapko I.V., Vlasov A.V. Selecting objects in the images by search method of the regions boundaries. 33

Khusainova G.Ya. The cleaning process simulation of the porous medium by solvents 39

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Ivanov A.P., Pychenkova O.S. The scale development of the banks social ranking 44

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499) 269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 5298

Сдано в набор 01.07.2015.
Подписано в печать 25.08.2015.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО "Канцлер"
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала "Автоматизация. Современные технологии" возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал "Автоматизация. Современные технологии" обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2015

УДК 621.86.01:62—525

Е.В. Аверьянов
(Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
С.А. Арфикян
(ООО «Камоцци пневматика», г. Москва),
В.Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф.
(Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва),
А.Е. Чередникова
(ООО «КОМЭСТ», г. Москва)

aver@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПНЕВМОПРИВОДА С МНОГОСТУПЕНЧАТЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ

Разработан мобильный робот вертикального перемещения, важнейшим компонентом которого является пневмопривод транспортных движений. Предложена математическая модель пневмопривода с многоступенчатым торможением в составе мобильного робота вертикального перемещения. Показана актуальность предложенной модели для проектирования и управления движением робота. Приведены результаты исследования предложенной модели пневмопривода в различных режимах движения робота с использованием программы MathCAD.

Ключевые слова: мобильный робот вертикального перемещения; математическая модель.

Mobile vertical moving robot, the most important component of which is a pneumatic actuator of transport movements is developed. A mathematical model of the pneumatic actuator with a multi-stage braking in the composition of the vertical moving robot is proposed. The proposed model actuality for the robot design and the robot movement control is shown. The research results of the pneumatic actuator proposed model in different modes of the robot movement through the use of the MathCAD program are adduced.

Key words: mobile vertical moving robot; mathematical model.

Повышение производительности труда и качества продукции зависит от модернизации производства на базе автоматизации технологических процессов с использованием мехатронных устройств и робототехники. Одним из важных направлений развития робототехники является создание мобильных роботов вертикального перемещения (МРВП) [1], которые позволят заменить человека в местах, где есть опасная внешняя среда или требуется дорогостоящая оснастка и строительные леса для обеспечения работ на вертикальных поверхностях.

Основное внимание при разработке МРВП уделяется созданию математических моделей как МРВП в комплексе, так и его отдельных узлов для оптимизации конструкции и параметров при выполнении конкретных инспекционных или технологических задач [2]. В последнее время наибольшее применение получили МРВП с вакуумными захватами и раздвижными платформами, имеющими наилучший показатель отношения полезной массы к массе транспортной платформы, более простую и надёжную конструкцию [3, 4].

Особенности использования пневмопривода на МРВП связаны с необходимостью снижения дополнительных инерционных нагрузок, возникающих при дискретном движении, для обеспечения надёжности фиксации подвижной платформы МРВП на вертикальной поверхности, по которой он должен двигаться с максимально возможной скоростью. Поэтому важно использовать регулирование скорости разгона и торможения для более плавного, но вместе с тем достаточно быстрого движения.

В МГТУ «СТАНКИН» совместно с ИПМех РАН в рамках НИОКР «Листоробот» (2011—2013 гг.) разработаны опытные образцы гаммы МРВП, предназначенные для выполнения инспекционных и технологических операций [5]. Они представляют собой шаговый дискретный механизм, состоящий из двух платформ, пневмопривода и вакуумных захватов. На

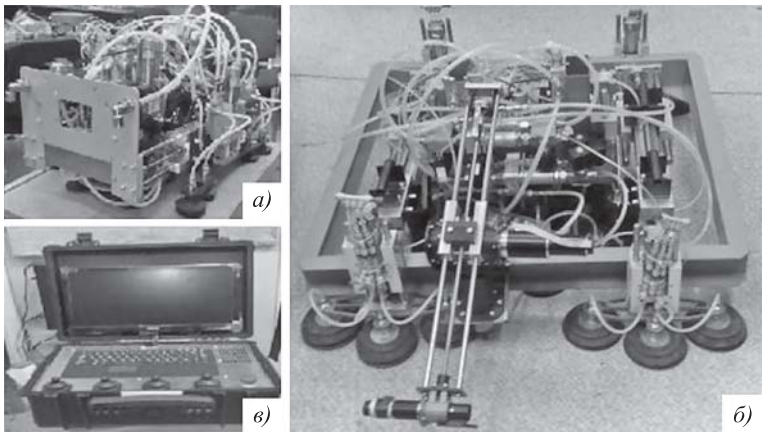


Рис. 1. Внешний вид опытных образцов гаммы МРВП:
а, *б* — инспекционный и технологический соответственно; *в* — пульт дистанционного управления

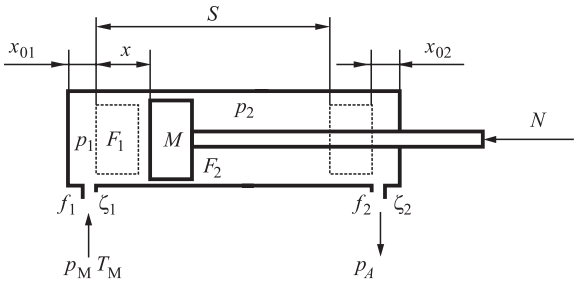


Рис. 2. Расчётная схема пневмопривода

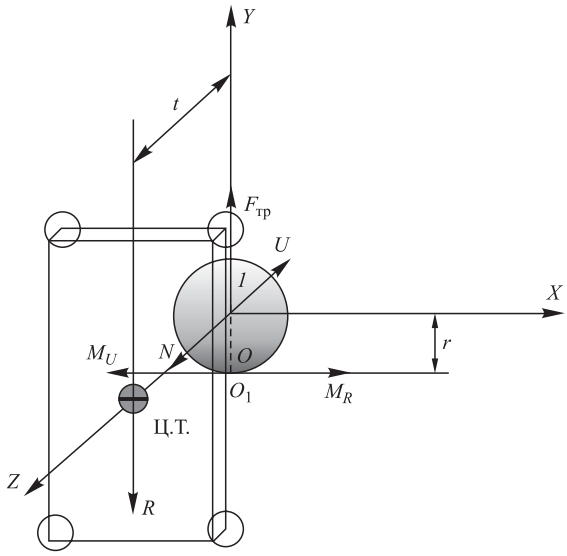


Рис. 3. Силы и моменты, действующие на подвижную платформу МРВП при контакте с вертикальной поверхностью в шаговом режиме

рис. 1 представлен внешний вид опытных образцов гаммы МРВП.

Существуют различные способы регулирования движения пневмопривода [6, 7]. При разработке гаммы МРВП для обеспечения плавного движения выбрано многоступенчатое торможение.

Методы разработки модели пневмопривода с многоступенчатым торможением указаны в работах [6, 7].

Возьмём за основу разработки математической модели пневмопривода с многоступенчатым торможением модель с одной ступенью изменения параметров выхлопной линии [6], расчётная схема которой представлена на рис. 2.

Математическая модель такого пневмопривода представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих движение исполнительного органа и изменение давлений в полостях исполнительного механизма:

$$\begin{cases} M\dfrac{d^2x}{dt^2} = p_1F_1 - p_2F_2 - p_{\text{А}}(F_1 - F_2) - N; \\ \dfrac{dp_1}{dt} = \dfrac{kf_1\sqrt{RT_{\text{М}}}}{F_1(x+x_{01})\sqrt{\zeta_1}}\sqrt{p_2^2 - p_{\text{А}}^2}\,\Phi(p_{\text{М}} - p_1) - \\ -\dfrac{kf_{1\text{М}}\sqrt{RT_{\text{М}}}}{F_1(x+x_{01})\sqrt{\zeta_{1\text{М}}}}\left(\dfrac{p_1}{p_{\text{М}}}\right)^{\frac{k-1}{2k}}; \\ \sqrt{p_2^2 - p_{\text{М}}^2}\,\Phi(p_1 - p_{\text{М}}) - \dfrac{kp_1}{x+x_{01}}\dfrac{dx}{dt}; \\ \dfrac{dp_2}{dt} = \dfrac{kp_2}{(S-x+x_{02})}\dfrac{dx}{dt} - \left[\begin{array}{l} \dfrac{f_{2T_i}}{\sqrt{\zeta_2}}\Phi(x - x_{\text{Т}}) + \\ +\dfrac{f_{2T_i}}{\sqrt{\zeta_2}}\Phi(x_{\text{Т}} - x) \end{array}\right]; \\ \dfrac{k\sqrt{RT_{\text{М}}}}{F_2(S-x+x_{02})}\left(\dfrac{p_1}{p_{\text{М}}}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\sqrt{p_2^2 - p_{\text{А}}^2}; \\ \dfrac{d^2x}{dt^2} = \dfrac{dx}{dt} = x = 0, \text{ если } x \leqslant 0; \\ \dfrac{d^2x}{dt^2} = \dfrac{dx}{dt} = 0, \;\; x = S, \text{ если } x \geqslant S, \end{cases} \quad (1)$$

где k — показатель адиабаты (коэффициент Пуассона); R — газовая постоянная; $T_{\text{М}}$ — температура газа в магистрали; p_1, p_1 — давление в соответствующих рабочих полостях цилиндра; $p_{\text{А}}$ — давление на выходе; $p_{\text{М}}$ — давление питания; x — координата положения поршня; x_{01}, x_{02} — приведённая координата, характеризующая объём вредного пространства; f_1, $f_{1\text{М}}$ — площадь проходного сечения трубопровода полости нагнетания при её наполнении и истечении в магистраль соответственно; f_2, $f_{2\text{Т}}$ — площадь проходного сечения выхлопной линии при разгоне и торможении соответственно; ζ_1, $\zeta_{1\text{М}}$ — коэффициенты сопротивления линий нагнетания при наполнении по-

лости нагнетания и при истечении в магистраль соответственно; ζ_2, $\zeta_{2\text{Т}}$ —коэффициенты сопротивления выхлопной линии при разгоне и торможении соответственно; M — масса подвижных частей; F_1, F_2 — эффективная площадь с соответствующей стороны поршня; S — максимальный ход поршня; N — статическая нагрузка.

На рис. 3 представлены силы и моменты, действующие на подвижную платформу МРВП при контакте с вертикальной поверхностью в шаговом режиме. МРВП зафиксирован на вертикальной поверхности XOY с помощью вакуумных захватов внутренней платформы. Для упрощения расчётов представим вакуумные захваты внутренней платформы в виде одного большого вакуумного захвата *1* с эквивалентной силой прижима U, имеющего эквивалентный по площади диаметр $D_з$. Внешняя платформа представлена в виде центра масс Ц.Т., лежащего на оси Z на расстоянии l от центра O. Ось Z направлена перпендикулярно вертикальной поверхности, по которой движется робот. Допустим, МРВП движется вдоль оси Y. При торможении внешней платформы возникает наибольший вращающий момент M_R относительно центра O_1 от внешних сил R на плече l, вектор которого направлен параллельно оси X. В нашем случае центр O_1 лежит на пересечении жёсткого края захвата с осью Y на расстоянии половины диаметра $D_з$, т. е. $r = \frac{D_з}{2}$. Вращающий момент компенсируется противоположно направленным моментом M_u от силы прижима U на плече r.

Сформулируем условия отсутствия отрыва и проскальзывания через ограничение ускорения инерционной силы $\frac{d_2x}{dt^2}$, возникающего при торможении пневмопривода:

$$\frac{d_2x}{dt^2} \leqslant \frac{K_з S_з r}{Ml}(p_\text{А} - p_з) + g\sin\alpha; \qquad (2)$$

$$\frac{d_2x}{dt^2} \leqslant \frac{S_з}{M(K_з\mu_з^{-1} + lr^{-1})}(p_\text{А} - p_з) + g\sin\alpha, \qquad (3)$$

где $K_з$ — коэффициент запаса; α — угол наклона оси штока пневмопривода к горизонту; $S_з$ — площадь вакуумного захвата; $p_\text{А}$ — атмосферное давление; $p_з$ — давление под вакуумным захватом.

При многоступенчатом торможении существуют несколько позиций поршня, в которых изменяются параметры выхлопной линии. Используя функцию Хэвисайда уравнение изменения давления в выхлопной полости можно записать в виде:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{kp_2}{(S - x + x_{02})}\frac{dx}{dt} - \frac{k\sqrt{RT_\text{М}}}{F_2(S - x + x_{02})}\left(\frac{p_1}{p_\text{М}}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\sqrt{p_2^2 - p_\text{А}^2}; \qquad (4)$$
$$\sum_{i=0}^{n}\frac{f_{2\text{Т}_i}}{\sqrt{\zeta_{2\text{Т}_i}}}\Phi\left[(x - x_{\text{Т}_i})(x_{\text{Т}_{i+1}} - x)\right],$$

где i — номер ступени торможения; $x_{\text{Т}_i}$ — координаты начала торможения; $\zeta_{2\text{Т}_i}$ — коэффициент сопротивления линии и дросселей; $f_{2\text{Т}_i}$ — площадь проходного сечения трубопровода на выхлопе; n — количество ступеней торможения.

С учётом сформулированных условий (2, 3 и 4), а также сил тяжести и трения, математическую модель пневмопривода с многоступенчатым торможением можно записать в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} M\dfrac{d^2x}{dt^2} = p_1F_1 - p_2F_2 - p_\text{А}(F_1 - F_2) - \\ -\eta\pi Db\mu(p_1 - p_2) - Mg\sin\alpha; \\ \dfrac{dp_1}{dt} = \dfrac{kf_1\sqrt{RT_\text{М}}}{F_1(x + x_{01})\sqrt{\zeta_1}}\sqrt{p_2^2 - p_\text{А}^2}\Phi(p_\text{М} - p_1) - \\ -\dfrac{kf_{1\text{М}}\sqrt{RT_\text{М}}}{F_1(x + x_{01})\sqrt{\zeta_{1\text{М}}}}\left(\dfrac{p_1}{p_\text{М}}\right)^{\frac{k-1}{2k}}; \\ \sqrt{p_2^2 - p_\text{М}^2}\Phi(p_1 - p_\text{М}) - \dfrac{kp_1}{x + x_{01}}\dfrac{dx}{dt}; \\ \dfrac{dp_2}{dt} = \dfrac{kp_2}{(S - x + x_{02})}\dfrac{dx}{dt} - \\ -\dfrac{k\sqrt{RT_\text{М}}}{F_2(S - x + x_{02})}\left(\dfrac{p_1}{p_\text{М}}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\sqrt{p_2^2 - p_\text{А}^2}; \\ \sum\limits_{i=0}^{n}\dfrac{f_{2\text{Т}_i}}{\sqrt{\zeta_{2\text{Т}_i}}}\Phi\left[(x - x_{\text{Т}_i})(x_{\text{Т}_{i+1}} - x)\right]; \\ \dfrac{d^2x}{dt^2} = \dfrac{dx}{dt} = x = 0, \text{ если } x \leqslant 0; \\ \dfrac{d^2x}{dt^2} = \dfrac{dx}{dt} = 0, x = S, \text{ если } x \geqslant S; \\ \dfrac{d^2x}{dt^2} \leqslant \dfrac{K_з S_з r}{Ml}(p_\text{А} - p_з) + g\sin\alpha; \\ \dfrac{d^2x}{dt^2} \leqslant \dfrac{S_з}{M(K_з\mu_з^{-1} + lr^{-1})}(p_\text{А} - p_з) + g\sin\alpha, \end{cases} \qquad (5)$$

где η — коэффициент, учитывающий трение в манжетах штока и направляющих; D — внутренний диаметр цилиндра; b — ширина манжеты поршня; μ — коэффициент трения между манжетой поршня и стенками цилиндра.

Масса подвижных частей M состоит из масс подвижных частей пневмопривода $M_{пр}$, одной из платформ $M_{пл1}$, передвигающейся в данный момент, жгута $M_ж$, состоящего из электро- и пневмопроводов, и полезной нагрузки $M_{пн1}$, установленной на этой платформе. Массу подвижных частей M разделим на постоянную и изменяющуюся составляющие. К изменяющейся составляющей отнесём массу жгута $M_ж$ и полезной нагрузки $M_{пн1}$.

Таким образом, система уравнений (5) показывает взаимосвязь параметров конструкции МРВП со статическими и динамическими характеристиками пневмопривода. Это позволяет решать задачи при проектировании и управлении МРВП, одними из которых являются:

расчёт пневмоцилиндра;

расчёт дросселей на выхлопной линии;

регулирование времени разгона и торможения пневмопривода в зависимости от массы M, угла α и вакуума в захватах ($p_А - p_з$);

формирование расчётных графиков и таблиц для выбора комплектующих.

Проектирование конструкции и узлов МРВП. Целью использования математической модели при проектировании является необходимость предварительного согласования и оптимизации параметров как конструкции МРВП в целом, так и его отдельных узлов, при условии выполнения требований технического задания (ТЗ). Как правило, при проектировании МРВП в ТЗ указываются такие основные требования, как тип поверхности, по которой МРВП движется, максимальная скорость движения, масса полезной нагрузки, соотношение полезной нагрузки к весу МРВП и габариты.

Следовательно, можно предложить следующий порядок использования математической модели:

создаётся компьютерная модель на основе системы уравнений (5), например, в программе MatCAD;

проводится предварительный расчёт массы подвижных частей M и времени движения подвижных частей в одном такте на основе требований ТЗ;

вводятся известные и рассчитанные величины в компьютерную модель;

определяются области существования решений модели и выводятся графики выбора параметров, например, времени разгона пневмопривода от прижимной силы;

по результатам программного расчёта и оптимизации формируются уточненные требования к конструкции МРВП и его узлам.

По математической модели (5) в программе MathCAD проведены исследования и построены графики работы пневмопривода в различных режимах.

На рис. 4 и рис. 5 представлены временные графики изменения координаты, скорости и ускорения выдвижении штока пневмоцилиндра в режиме без дополнительного торможения и демпфирования и в режиме многоступенчатого торможения с демпфированием соответственно.

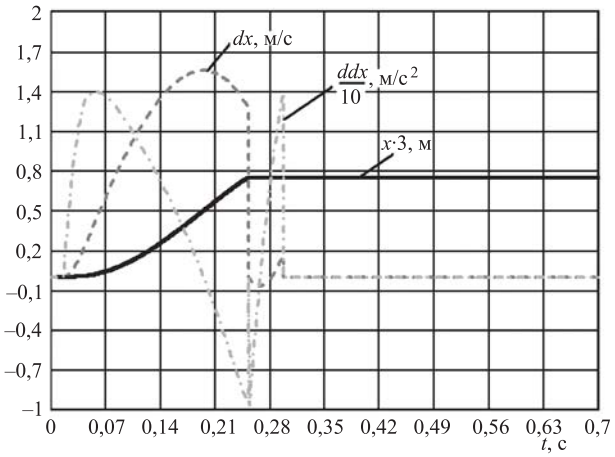


Рис. 4. Временной график изменения координаты *x*, скорости *dx* и ускорения *ddx* штока пневмоцилиндра при выдвижении без системы многоступенчатого торможения и демпфирования

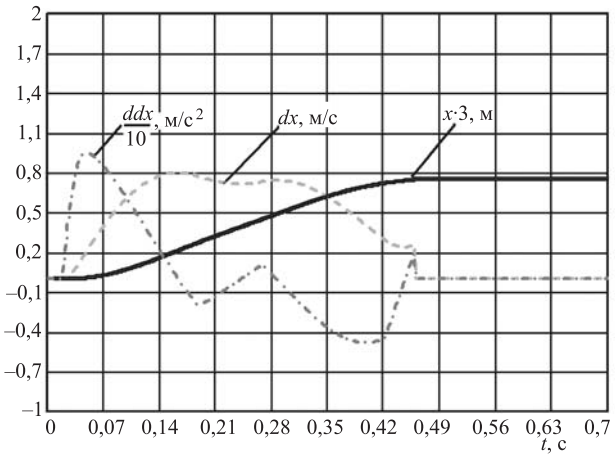


Рис. 5. Временной график изменения координаты *x*, скорости *dx* и ускорения *ddx* штока пневмоцилиндра при выдвижении с системой многоступенчатого торможения и демпфирования

Из графиков видно, что в режиме многоступенчатого торможения с демпфированием удалось уменьшить скорость и ускорение в конце движения в 7 раз при незначительном увеличении продолжительности движения на 0,15 с.

Система управления пневмоприводом МРВП. При движении МРВП могут изменяться влияющие на надёжность сцепления с вертикальной поверхностью такие факторы, как:

проекция силы тяготения на ось штока пневмопривода, зависящая от угла наклона α;

качество поверхности, по которой движется МРВП (шероховатость, коэффициент трения, кривизна и др.);

величина вакуума в захватах и количество несцепившихся захватов;

масса полезной нагрузки при взятии на борт МРВП дополнительного груза в процессе выполнения технологической задачи.

Полная или частичная компенсация этих изменений возможна при автоматическом регулировании пневмопривода при перерасчёте времени разгона и торможения с известными и постоянными параметрами выхлопной линии для каждой ступени торможения на основе данных, поступающих с соответствующих датчиков МРВП. При использовании на выхлопной линии регулируемых по проходному сечению клапанов возможно регулирование изменением сечения этих клапанов при фиксированных позициях ступеней торможения. Цель такого регулирования — согласование инерционных нагрузок для каждого изменения ситуации под действием указанных факторов и предотвращение отрыва МРВП от поверхности.

Заключение. В результате выполненных теоретических исследований предложены:

математическая модель, представляющая собой систему уравнений (5), описывающая статические и динамические характеристики пневмопривода с многоступенчатым торможением в составе МРВП;

порядок использования математической модели для решения комплекса задач по проектированию и управлению пневмоприводом;

анализ динамики математической модели при помощи программы MathCAD, который показывает, что многоступенчатое торможение с демпфированием позволяет снизить скорость и ускорение в конце движения до 7 раз;

математическая модель может войти в состав разработки математической модели всего МРВП и широкого спектра пневмоприводов, управляющих движением в мехатронных узлах и робототехнических системах.

Библиографические ссылки

1. **Градецкий В.Г., Рачков М.Ю.** Роботы вертикального перемещения. М.: Типография Министерства Образования РФ, 1997. 223 с.

2. **Егоров О.Д., Подураев Ю.В.** Конструирование мехатронных модулей. М.: МГТУ СТАНКИН, 2005. 182 с.

3. **Luk B.L., Collie A.A., Cooke D.S. and Chen S.** (2005) Walking and climbing service robots for safety inspection of nuclear reactor pressure vessels. In, 2005 Asia Pacific Conference on Risk Management and Safety, Hong Kong, China, 01—02 Dec 2005. P. 432—438.

4. **Armada M.A., Santos P.G., Jiménez M.A., Prieto M.** Application of CLAWAR Machines. I.J. Robotic Res. 2003. Vol. 22(3—4). P. 251—264.

5. **Аверьянов Е.В., Коваленко Б.Б., Костин А.В., Пелепас Е.И., Подураев Ю.В., Яковлев С.Ф.** Основные аспекты создания отечественных технологических мобильных роботов вертикального перемещения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8. С. 23—27.

6. **Илюхин Ю.В., Арфикян С.А.** Быстродействующие электропневматические приводы массивных объектов с дискретным компьютерным управлением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 11. С. 11—17.

7. **Донской А.С.** Математическое моделирование процессов в пневматических приводах: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 121 с.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении, а также непосредственно на сайте издательства «Инновационное машиностроение».

УДК 681.5

Ш.Х. Коркмазов
(Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»)
shamil_korkmazov@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ СТАНОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

Предложена математическая модель производственного процесса в задачах оперативного управления, позволяющая устанавливать оптимальный режим работы автоматизированной станочной системы, соответствующий необходимому уровню производительности и материальных затрат.

Ключевые слова: математическая модель; производственный процесс; производственная система; автоматизированная станочная система.

A mathematical model of the production process in the operational management tasks is proposed. The model allows you to set the optimal operation mode of an automatic machine tool system corresponding to the required level of productivity and material expenses.

Key words: mathematical model; production process; production system; automatic machine tool system.

В общем виде задача оперативного управления выглядит следующим образом. Имеется некоторое множество ресурсов автоматизированной станочной системы (АСС) R, с помощью которых необходимо выполнить определённый набор заданий:

$$Q = \{q_i/i = 1, ..., I_Q\},$$

где I_Q — число наименований заданий в интервале планового периода $T_Ф$; $T_Ф$ — фактическое время планового периода, представляющее собой ограничение на время достижения цели.

Каждое из заданий связано с выпуском определённой позиции номенклатуры в рамках поставленной цели. Далее будем называть выполнение (выпуск) i-го задания q_i процессом, а совокупность всех таких процессов производственным процессом (ПП).

Таким образом, в АСС выполняется одновременно некоторое количество независимых процессов, время от времени взаимодействующих друг с другом. Такие дискретные системы с параллельно функционирующими и асинхронно взаимодействующими процессами не описываются соответствующим образом в терминах классической теории управления. При их анализе и синтезе важно знать не только функции, выполняемые системой, но и структурные свойства системы как таковой. Поэтому и модель системы должна отражать её структуру и указанные свойства.

Процессы в АСС реализуются на ограниченном множестве ресурсов. Имеет место взаимодействие множества непересекающихся процессов выпуска каждой позиции номенклатуры и множества взаимосвязанных ресурсов. Оперативное управление должно регулировать это взаимодействие. Необходимо осуществлять такое управление, которое оптимизировало бы или позволяло получать близкие к оптимальным показатели эффективности работы АСС при заданных ограничениях на ресурсы и законы функционирования [1].

В наиболее общем виде математическая модель объекта управления представляет собой некоторую зависимость или алгоритм F, позволяющую по значениям входных переменных определить значения выходных переменных (состояние модели) $\bar{Y}$. При этом входные переменные по составу можно разделить на следующие виды:

1) неуправляемые наблюдаемые $\bar{X}$, значения которых можно измерить и иметь в информационной автоматизированной системе управления (ИАСУ) АСС, но на которые она непосредственно воздействовать не может;

2) ненаблюдаемые неуправляемые $\bar{E}$, к ним относятся случайные возмущения, т. е. такие переменные, величину которых нельзя измерить и на которые ИАСУ не может непосредственно повлиять; система управления измеряет лишь последствия действия случайных возмущений — отклонения хода ПП и состояние ресурсов АСС (отказавших или разладившихся);

3) управляемые $\bar{U}$, представляющие собой величины, которые определяются непосредственно ИАСУ. К таковым можно отнести время начала и окончания отдельных операций, их последовательность во времени, выделяемое количество ресурсов на операции и т. п.

В результате модель можно представить в виде:

$$\bar{Y} = F(\bar{X}, \bar{U}, \bar{E}). \quad (1)$$

Таким образом, модель — это некоторое высказывание на любом языке относительно связи входа и выхода, т. е. алгоритм, который показывает, как по имеющейся информации о входных параметрах $\bar{X}$ и $\bar{U}$ определить выход $\bar{Y}$, не обращаясь к реальному объекту.

При оперативном управлении АСС управляемым объектом является производственная система (ПС). Её состояние $\bar{Y}(t)$ в каждый момент времени t может быть описано множеством значений параметров ресурсов $\bar{\Omega}(t)$ и множеством расчётных выходных показателей $\bar{\alpha}(t)$, характеризующих работу ПС в интервале времени $[t_0, t]$, где t_0 — начальный момент времени работы системы:

$$\bar{Y}(t) = \begin{bmatrix} \bar{\Omega}(t) \\ \bar{\alpha}(t) \end{bmatrix}.$$

К расчётным выходным показателям $\bar{\alpha}(t)$ относят, например, машинное время работы каждого станка, время простоя станка по отдельным причинам, суммарное время ожидания деталей в очереди и т. д. Состав этих параметров зависит от постановки задачи управления.

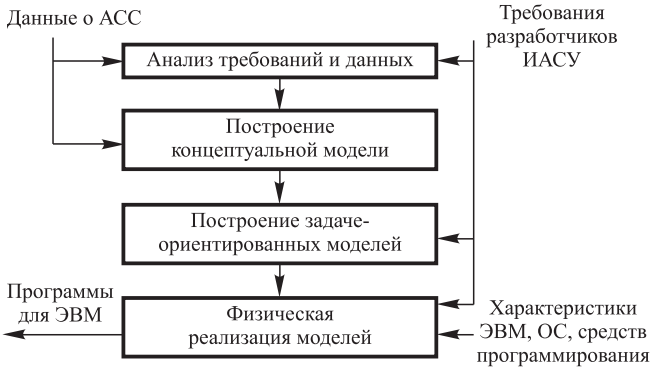
Введённый таким образом вектор состояния ПС $\bar{Y}(t)$, включающий в себя совместно с измеряемыми параметрами ресурсов некоторое множество вычисляемых параметров, можно считать вектором состояния увеличенной размерности.

Состояние ПС изменяется благодаря приложенному к ней целенаправленному управлению $\bar{U}(t)$, а также под влиянием случайных возмущений $\bar{E}(t)$, таких как отказ инструмента, станка и т. п. Изменение во времени состояния ПС описывает ПП. Математическую модель ПП представим в виде

$$\bar{Y}(t) = F\left[\bar{Y}(t_0); \bar{Y}_{[t_0,t]}; \bar{E}_{[t_0,t]}\right], \quad (2)$$

где F — некоторый оператор, позволяющий при известных в интервале времени $[t_0, t]$ управлении и возмущениях, а также начальном состоянии системы $\bar{Y}(t_0)$, определить её состояние в момент времени t.

Процесс управления в АСС является дискретным. Можно принять, что протекание ПП от момента t и далее зависит только от состояния ПС в этот момент времени и последующих значений управления и возмущений,



Уровни построения АСС

и не зависит от того, каким образом ПС оказалась в этом состояние, т. е. от предыстории ПП. Модель дискретного ПП запишем в виде:

$$\bar{Y}_{i+1} = F(\bar{Y}_i, \bar{U}_i, \bar{E}_i). \quad (3)$$

Как видно из выражения (3), состояние ПС в момент $(i + 1)$ зависит только от её состояния в i-й момент времени, действия управления и возмущения.

Модель АСС представим как совокупность (взаимодействие) моделей двух типов — управления и производственной системы. Многоуровневость системы управления, обусловленная иерархией задач оперативного управления, предполагает наличие множества моделей объекта управления.

Построение модели ПП АСС, т. е. его формализацию, будем рассматривать на трёх уровнях абстрагирования (см. рисунок) [2].

1. ***Концептуальный уровень***, на котором анализируется содержание информации об интересующих при управлении аспектах АСС и на котором описание ведётся на понятийном или концептуальном уровне. Концептуальная модель описывает классы ресурсов АСС, правила и ограничения, имеющие постоянный или малоизменчивый характер, т. е. данная модель содержит знания разработчиков ИАСУ об АСС и требования пользователей, в случае оперативного управления диспетчеров и плановиков. Концептуальный уровень построения модели носит неформализованный или слабоформализованный характер.

2. ***Задачеориентированный уровень***, на котором осуществляется в рамках концептуальной модели АСС построение более частных и подробных моделей, описывающих какой-либо аспект АСС или некоторое их множество, и которые ориентированы на применение конкретных методов решения. Это могут быть модели линейного программирования, ими-

тационные, модели динамического программирования, балансовые и др.

3. ***Физический уровень***, на котором модель реализуется в виде программы для ЭВМ на конкретном языке, в конкретной операционной системе, с конкретным информационным обеспечением и т. д.

В основе построения всех задачеориентированных моделей АСС лежит концептуальная модель, и от её качества во многом зависит эффективность разработки системы управления. Важнейшим аспектом следует считать единственность концептуальной модели проблемной области для различных решаемых задач и целей пользователей (здесь пользователями моделей выступают разработчики ИАСУ). Требования каждого пользователя должны быть учтены при построении модели.

Модель вида 2 представляет собой временную синхронную модель дискретной системы, где события явно привязаны к определённым моментам или интервалам времени, в которые происходит одновременное изменение состояния всех ресурсов производственной системы. Смена состояний происходит последовательно.

Недостатками модели применительно к оперативному управлению можно считать:

сложность в определении времени начала, длительности и окончания событий вследствие параллельного выполнения процессов;

необходимость менять общее состояние модели при изменении состояния любого из ресурсов, но, как правило, текущее изменение носит локальный характер и не затрагивает большую часть системы; следствием данного недостатка является низкая оперативность работы с моделью;

недостаточная наглядность причинно-следственных связей между событиями.

Библиографические ссылки

1. **Заболотский В.П., Оводенко А.А., Степанов А.Г.** Математические модели в управлении: учеб. пособ. СПб.: ГУАП, 2001. 196 с.

2. **Емельянов В.В., Овсянников М.В.** Концептуальная модель производственного процесса. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987. 490 с.

УДК 663.551.61

А.А. Шевцов, д-р техн. наук, проф, **А.В. Дранников,** д-р техн. наук, доц, **А.С. Муравьёв**
(Воронежский государственный университет инженерных технологий)

79204104299@ya.ru

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКООБРАЗНОГО ПРОДУКТА ИЗ ФИЛЬТРАТА СПИРТОВОЙ БАРДЫ

Для реализации энергоэффективной технологии получения порошкообразного продукта из фильтрата спиртовой барды предложен програмно-логический алгоритм управления технологическими параметрами, обеспечивающий повышение качества готового продукта, энергетическую эффективность, повышение экологичности, снижение себестоимости готовой продукции за счёт рекуперации и утилизации вторичных энергоресурсов.

Ключевые слова: фильтрат спиртовой барды; распылительная сушка; энергосбережение; управление.

Program-logic algorithm of the technological parameters control for the energy-efficient technology implementation of the producing a powdery product from the filtrate spirit bards is proposed. This algorithm provides the finished product quality growth, energy efficiency, ecological compatibility growth, reducing the cost of finished products at the expense of recovery and recycling of secondary energy resources.

Key words: filtrate spirit bards; spray drying; energy saving; control.

Определяющими факторами выбора современной энергосберегающей технологии получения высококачественных кормовых добавок являются точность и надёжность управления установленных режимных параметров процесса, качество исходного сырья и экологичность производств.

Утилизация барды как отхода спиртового производства становится экономичически целесообразна в связи с ростом стоимости кор-

мов. Кормовая ценность барды составляет 0,5...0,8 кормовых единиц на 1 дал жидкой барды, или 50...80 кг кормовых единиц/м^3 в зависимости от состава перерабатываемого сырья. Содержание перевариваемого протеина в такой барде составляет более 180 г на одну кормовую единицу при средней норме 80...100 г [1, 2], поэтому использование сухой барды в рационе птиц экономически выгодно [3].

В настоящеё время российские ученые ведут исследования по изысканию новых источников белка и повышению его качества.

При сгущении фильтрата барды с последующей распылительной сушкой при получении высококачественного порошкообразного продукта снижаются энергозатраты, повышается экологичность производства [4].

Предложен способ производства и алгоритм управления технологическими параметрами (см. рисунок), обеспечивающих повышение качества готового продукта, энергетическую эффективность, повышение экологичности, снижение себестоимости готовой продукции.

Исходную барду из аппаратного цеха спиртового завода подают в сепаратор *1*, в котором осуществляют её грубое разделение на твёрдую фазу и фильтрат. Далее фильтрат по линии *9.7* направляют на тонкое разделение в фильтр тонкой очистки *2*, после которого твёрдую фазу соединяют с твёрдой фазой, полученной после сепаратора *1*, и отводят по линии *0.8*, а фильтрат с концентрацией сухих веществ 4...5 % поступает в накопительную ёмкость фильтрата *6*, а затем его подают в вакуум-выпарной аппарат *7*.

Фильтрат в аппарате *7* выпаривают под разрежением 0,3...0,5 атм и получают сгущённый раствор с концентрацией сухих веществ 30...40 %, который по линии *9.8* направляют в распылительную сушилку *13*. На выходе из сушилки *13* получают порошкообразный продукт с влажностью 8...10 % и дисперсностью 70...80 мкм.

Разрежение в аппарате *7* создают с помощью пароэжекторной установки, включающей в себя парогенератор *12*, эжектор *5*, конденсатор *8*, сборник конденсата *9* и насос *11*,

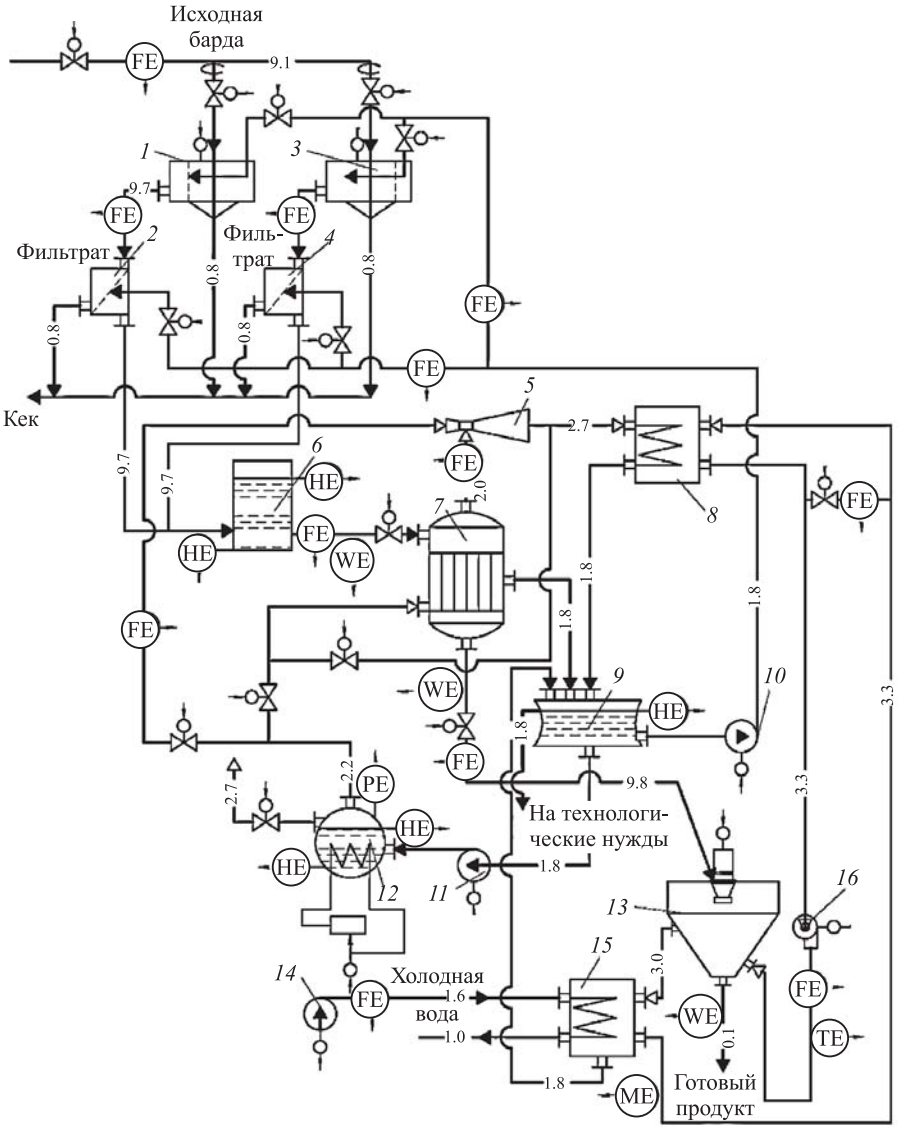


Схема производства порошкообразного продукта из фильтрата спиртовой барды: *1*, *3* — сепараторы; *2*, *4* — фильтры тонкой очистки; *5* — эжектор; *6* — накопительная ёмкость фильтрата; *7* — вакуум-выпарной аппарат; *8* — конденсатор; *9* — сборник конденсата; *10*, *11*, *14* — насосы; *12* — парогенератор; *13* — распылительная сушилка; *15* — теплообменник-рекуператор; *16* — вентилятор; датчики: *FE* — расхода; *HE* — уровня; *WE* — влажности; *PE* — давления; *TE* — температуры; *ME* — влагосодержания; материальные потоки: *0.1* — порошкообразный продукт; *0.8* — твёрдая фаза барды; *1.0* — отработанная вода; *1.6* — холодная вода; *1.8* — конденсат; *2.0* — пар отработанный; *2.2* — рабочий пар; *2.7* — смесь рабочего и отработанного пара; *3.0* — отработанный сушильный агент; *3.3* — сушильный агент; *9.1* — исходная барда; *9.7* — фильтрат барды; *9.8* — сгущённый фильтрат

которые работают в замкнутом термодинамическом цикле.

Полученный в парогенераторе *12* рабочий пар давлением 3...3,2 атм разделяют на две части, одну из которых по линии *2.2* направляют в редукционный вентиль для снижения давления до 1...1,2 атм, и далее — в греющую камеру вакуум-выпарного аппарата *7*, а другую часть рабочего пара давлением 3...3,2 атм — в сопло эжектора *5*. Эжектируемые по линии *2.0* пары из вакуум-аппарата *7* создают в нём разрежение 0,3...0,5 атм при температуре кипения раствора 70...80 °С.

Смесь отработанного рабочего и эжектируемого паров температурой 110...120 °С по линии *2.7* направляют в конденсатор *8*, в котором за счёт рекуперативного теплообмена подогревают воздух до 75...80 °С. Нагретый воздух вентилятором *16* по линии *3.3*. подают в распылительную сушилку *13*.

Отработанный воздух из сушилки *13* по линии *3.0* отводят в теплообменник-рекуператор *15*, куда по линии *1.6* насосом *14* подают холодную воду, а по линии *1.0* выводят отработанную воду. За счёт рекуперативного теплообмена между холодной водой и отработанным после сушилки *13* воздухом происходит снижение его температуры до точки росы. При этом осуществляют конденсацию содержащейся в отработанном воздухе капельной жидкости в количестве испаряемой из продукта влаги на охлаждающей поверхности теплообменника-рекуператора *15*. Осушенный таким образом воздух по линии *3.3* направляют сначала в конденсатор *8*, а затем вновь в распылительную сушилку *13* с образованием замкнутого цикла.

Образовавшийся конденсат после теплообменника-рекуператора *15* вместе с конденсатом после греющей камеры вакуум-выпарного аппарата *7* и конденсатора *8* по линиям *1.8* отводят в сборник конденсата *9*. При этом одну часть конденсата из сборника *9* насосом *11* направляют в парогенератор *12*, оснащённый предохранительным вентилем, для пополнения в нём уровня воды. Другую часть конденсата насосом *10* подают в сепаратор *3* и фильтр тонкой очистки *4*, работающих в режиме противоточной водной регенерации для восстановления пропускной способности фильтрующих элементов.

Информация о ходе процесса получения порошкообразного продукта из фильтрата спиртовой барды, подготовки воздуха, пара и исходной барды с помощью датчиков передаётся в микропроцессор, который по заложенному в него программно-логическому алгоритму осуществляет оперативное управление технологическими параметрами с учётом накладываемых на них двухсторонних ограничений, обусловленных как получением готового продукта высокого качества, так и экономической целесообразностью.

На основании информации, полученной с датчика о текущем расходе исходной барды, в линии *9.1* микропроцессор устанавливает частоту вращения ротора сепаратора *1*. Расход фильтрата после сепаратора *1* измеряется датчиком *28*, установленным на линии *9.7*, в случае уменьшения его значения ниже заданных значений производительности сепаратора *1*, что свидетельствует о необходимости регенерации фильтрующих элементов, микропроцессор переводит подачу потока барды в сепаратор *3*. Фильтрат после фильтров тонкой очистки *2, 4* направляется в промежуточный сборник *6*, при этом контролируется верхний и нижний уровень.

Микропроцессор по значениям расхода и влажности фильтрата перед его подачей на выпаривание своевременно направляет фильтрат в корпус вакуум-выпарного аппарата *7*. Микропроцессор по значениям влагосодержания осушенного воздуха после теплообменника-рекуператора *15* в линии *3.3* задействует насос *14*, осуществляя контроль за расходом холодной воды.

В линии *9.8* по значениям влажности и расхода упаренного фильтрата после вакуум-выпарного аппарата *7* микропроцессор в случае увеличения влажности фильтрата уменьшает расход фильтрата, в случае уменьшения — увеличивает. Для регулирования влажности фильтрата микропроцессор увеличивает расход рабочего пара в линии *2.2* перед подачей его в вакуум-выпарной аппарат *7* при увеличении влажности и уменьшает при её снижении.

На основании текущих значений расхода пара по линии *2.2* и по линии *2.0* микропроцессор устанавливает коэффициент эжекции пароэжекторной холодильной машины воздействием на соотношение расходов рабочего пара, подаваемого в сопло эжектора *5*, и эжектируемых паров из вакуум-аппарата *7* через конденсатор *8* путём изменения расхода рабочего пара в линии *2.2*.

Микропроцессор по измеренным значениям расхода и температуры подогретого воздуха перед распылительной сушилкой *13* регулирует мощность вентилятора *16*. При сниже-

нии температуры ниже установленной микропроцессор направляет дополнительную часть рабочего пара давлением 1,0...1,2 атм по линии *2.7* в конденсатор *8*, который в свою очередь рекуперативным теплообменом нагревает осушенный воздух после теплообменника-рекуператора *15*. При увеличении текущей температуры подогретого воздуха выше заданного значения микропроцессор подаёт сигнал для подмешивания воздуха после конденсатора *8* с отработанным воздухом после теплообменника-рекуператора *15*.

Микропроцессор осуществляет непрерывную стабилизацию давления насыщенного пара в парогенераторе *12*. При этом достигается заданное значение производительности парогенератора *12*, необходимое для выпаривания фильтрата в вакуум-аппарате *7* и нагрева воздуха в конденсаторе *8*. При изменении уровня конденсата в парогенераторе *12* микропроцессор осуществляет двухпозиционное регулирование приводом питающего насоса *11*. Причём он включает питающий насос *11* при достижении уровня конденсата в парогенераторе *12* нижнего заданного значения и отключает его при достижении верхнего заданного значения.

По измеренному значению влажности готового порошкообразного продукта в линии *0.1* микропроцесор осуществляет при необходимости её коррекцию воздействием на расход и температуру подогретого воздуха в линии рециркуляции *3.3*.

Таким образом, предлагаемый программно-логический алгоритм позволяет обеспечить стабильное качество готовой продукции благодаря высокой точности и надёжности управления технологическими параметрами, снизить энергозатраты, используя пароэжекторную установку и контур рециркуляции по сушильному агенту, создать экологически безопасные условия эксплуатации оборудования.

Библиографический список

1. **Яровенко В.Л., Маринченко В.А., Смирнов В.А.** Технология спирта [под ред. В.Л. Яровенко]. М.: Колос; «Колос-пресс», 2002. 465 с.

2. **Зуева Н.В.** Изучение количественного и качественного белкового состава послеспиртовой зерновой барды / Н.В. Зуева, Г.В. Агафонов, Л.В. Клинова, А.Н. Долгов // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2013. № 4. С. 30—33.

3. **Леденев В.П.** Внедрение безотходных ресурсо- и энергосберегающих технологий — перспективный путь развития спиртовых заводов России // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2007. № 2. С. 18—19.

4. **Шевцов А.А., Дранников А.В., Муравьев А.С.** Энергосберегающая технология утилизации фильтрата послеспиртовой барды // Известия вузов. Пищевая технология. 2014. № 4. С. 78—80.

УДК 621.9

В.В. Кузьмин, д-р техн. наук, проф., **С.Ю. Калякулин**
(Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»)

rim-tm@mail.ru

ЭТАПЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ РАСЧЁТЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Выделены и описаны этапы преобразования информации от геометрического чертежа детали к комплекту технологической документации. Практическая реализация этих этапов позволит значительно увеличить степень автоматизации расчётов параметров технологических процессов (ТП) в системах автоматизированного проектирования ТП (САПРТП).

Ключевые слова: автоматизация; преобразование информации; планирование; информационные базы; САПРТП.

Information transformation stages from the details geometric drawing details to the kit of technical documentation complete set are chosen and described. The practical implementation of these stages allows considerably increase of the parameters calculation automation degree of technological processes (TP) in computer-aided designing systems TP (CAD TP).

Key words: automation; transformation of information; planning; information base; CAD TP.

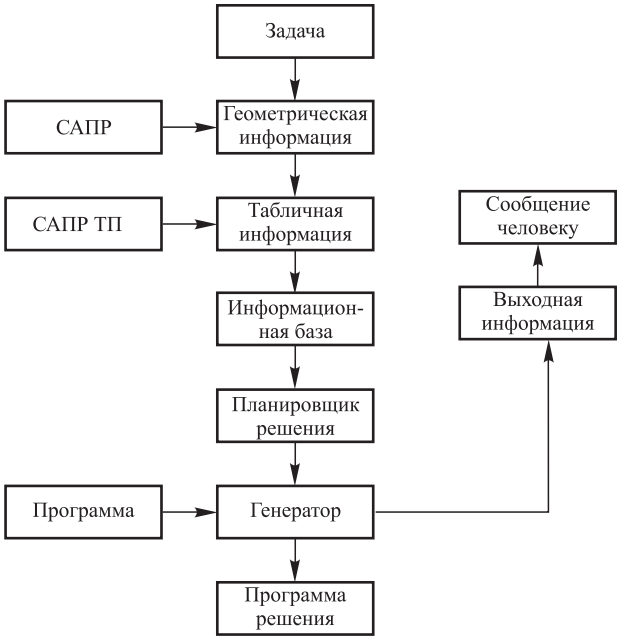
При автоматизированном расчёте параметров ТП на «вход» системы САПРТП поступают конструкторские параметры, заданные чертежом детали, которые должны пройти определённое количество шагов, чтобы на «выходе» (технологическая документация) получить искомое значение параметра. Шаги, которые необходимо пройти для получения выходной информации, включают в себя: поиск по таблицам (SQL — запросы), выражения, функции, результаты внешних программ. Движение по такой цепочке может осуществляться в ручном, автоматизированном или автоматическом режимах. Проследив всю цепочку шагов, можно будет судить об общей степени автоматизации расчётов.

Степень автоматизации — это обратная степень ручных расчётов параметров технологического процесса ко всем производимым расчётам. На основании этого можно ввести понятие коэффициента автоматизации ($K_а$), отражающего численное значение степени автоматизации расчётов параметров ТП в конкретной САПРТП.

Степень автоматизации расчётов выражает степень автоматизации конкретного этапа.

Всего можно выделить четыре этапа автоматизации:

1) передача геометрической информации из графических систем в технологическую среду САПРТП;



Последовательность реализации этапов расчета параметров ТП

2) создание информационных моделей, которые указывают, какие существуют связи между переменными и в каком виде они реализованы;

3) планирование автоматической последовательности обращений к таблицам для передачи данных с выхода одной таблицы на вход другой;

4) генерация расчётов — автоматическая передача управления программе расчёта очередного параметра после окончания работы программ расчёта предыдущего параметра.

Данным вопросом на начальных этапах занималось большое количество учёных. В справочнике технолога-машиностроителя [1] подробно описан второй этап создания информационных моделей режимов резания, в работе [2] даны информационные модели расчёта припусков и т. д. На сегодняшний день существует множество программных продуктов, позволяющих, в том числе и «online», рассчитывать определённый параметр ТП (режимы резания, нормы времени и т. д.). В таких программах хорошо реализованы этапы планирования и генерации, но отсутствует автоматизация ввода «входной» информации, т. е. реализация первого этапа равна нулю.

Последовательность реализации этапов расчёта параметров ТП можно представить в виде блок-схемы (см. рисунок).

Если учесть, что при полной автоматизации коэффициент $K_а = 1$, то коэффициент автоматизации каждого из четырёх этапов $K_{аi}$, где i — этап автоматизации, не может превышать 0,25.

Рассмотрим более подробно каждый из перечисленных этапов:

1. Передача геометрической информации из графических систем в технологическую среду САПРТП. Всю информацию, передаваемую из одной системы в другую, можно разделить на графическую и текстовую. К графической информации, главным образом, относятся поверхности детали, а к текстовым — конструкторские обозначения, указанные на чертеже (обозначение шероховатости, допустимых отклонений формы и расположения поверхностей, параметров качества поверхностного слоя).

Существующие методы преобразования конструкторской информации в технологическую (табличную) подразделяются на следующие группы: математические, связанные с распознаванием свойств поверхности для 2D- и 3D-графических моделей; специальные

языки описания деталей; диалоговые средства преобразования одномерных примитивов в свойства поверхностей; средства параметризации; простое кодирование таблиц с помощью текстовых редакторов.

2. Создание информационных моделей, которые указывают, какие существуют связи между переменными и в каком виде они реализованы (математические выражения, таблицы, результаты внешних программ и т. д.). Например, связь между САПРТП СИТЕП МО и T-Flex CAD реализована с помощью переменных. Передача информации в САПРТП осуществляется копированием ID — номера примитива чертежа. Далее при помощи таблиц, выражений, подключения внешних программ образуются связки между входными и выходными параметрами.

Частью информационных моделей являются информационные базы или базы данных (БД). Вопросу управления базами данных посвящено большое количество работ [3, 4 и др.]. В работе [5] описаны характеристики, которым должны соответствовать системы БД. Основными из них являются: производительность, способность обеспечить время ответа, удовлетворительное для человека. Кроме того, система БД должна обеспечивать соответствующую пропускную способность для обработки запросов; возможность поиска, когда пользователь БД может обращаться к ней с самыми различными вопросами по поводу хранимых данных; целостность, если БД содержит данные, используемые многими пользователями, при этом важно, чтобы элементы данных и связи между ними не разрушались; безопасность и секретность, т. е. данные в системах БД должны храниться в тайне и сохранности; простоту: средства, которые используются для представления общего логического описания данных, должны быть простыми и изящными.

3. Планирование автоматической последовательности обращений к таблицам для передачи данных с выхода одной таблицы на вход другой. Так как на «вход» САПРТП поступает геометрическая информация, а «выходом» является параметр, необходимо спланировать автоматическую последовательность обращений к таблицам. Обращение к таблицам происходит с помощью SQL-запросов, которые должны работать так, чтобы передать данные выхода одной таблицы на вход другой. Планировщик является программой, которая по вычислительной модели задач и спискам её входных и выходных переменных ведёт поиск доказательства разрешимости задачи. Примером реализации работы планирования в САПРТП служит система СИТЕП МО. Планирование в ней происходит за счет связей между переменными. В СИТЕП МО возможны следящие типы переменных: конкретные значения; переменные T-Flex CAD; функции (выражения); результаты SQL-запросов; результаты внешних программ. Данные какой-либо переменной могут служить входом для БД, в которой по выбранному критерию происходит поиск, а затем вывод информации в виде другой переменной, которая, в свою очередь, может служить входом следующей БД. При помощи переменных создаются технологические модули, где реализованы связи между участвующими в расчёте параметрами ТП.

Планирование может происходить и в самих САПР (КОМПАС-3D, T-flex CAD и др.), роль планировщика там выполняют таблицы переменных, в которые можно заносить необходимые параметры чертежа детали.

4. Генерация расчётов. После того как на основе информационных моделей спланирована последовательность расчёта переменных, появляется задача расчёта параметров ТП. Необходимо знать, какие этапы необходимо привлечь, чтобы получить требуемый параметр. Далее на основе таблиц отрабатываются отношения между параметрами. Для решения этой задачи используется генератор программ, предназначенный для реализации оператора задач. Он воспринимает оператора задач на входном языке и переводит его на внутренний язык системы, определяет последовательность модулей, которые необходимо выполнить для решения задачи, организует связь между модулями, объединяя их в программу решения задачи. Программа решения задачи составляется в окончательном виде до начала вычислений, т. е. генератор должен стать генератором компилирующего типа. Преимущество таких генераторов заключается, прежде всего, в том, что они позволяют составлять крупные программы хорошего качества, которые можно сохранять и использовать многократно для решения задач.

Этапы планирования и генерации успешно реализованы в системе программирования высокого уровня ПРИЗ ЕС [6], в которой ЭВМ выступает в роли интеллектуального партнёра. Система ПРИЗ является частью системы математического обеспечения (СМО) ЕС ЭВМ, предназначенного для эксплуатации на ЭВМ и разработки новых программ. Основ-

ной принцип разработки программ — принцип модульности, позволяющий составлять и обрабатывать независимо друг от друга куски программ необходимого размера — модули.

Система программирования ПРИЗ содержит средства автоматизации выборки модулей и автоматического построения модулей для связывания других, например модули связи для передачи данных, преобразования форматов, преобразования единиц измерения и т. д. Если для объединения модулей в единую программу в системах программирования необходимо их явно указывать в вызове подпрограммы или макрооператоре, то система ПРИЗ позволяет во многих случаях отказаться от явного указания модулей, которые должны быть собраны в окончательную рабочую программу. Поэтому пользователь системы в значительной степени освобождается от программирования, но он обязан описывать условия задачи, по которым далее автоматически синтезируется программа. Кроме компилирующего режима применения системы ПРИЗ, имеется еще интерпретирующий режим, при котором автоматически составные модули интерпретируются. Данная система разработана эстонскими учёными М.И. Кахро, А.П. Калья, Э.Х. Тыугу в 80-х гг. прошлого века [7].

После того как задача решена, т.е. получена выходная информация, представленная в виде переменных технологического модуля, необходимо настроить связь между переменными и соответствующими окнами карт технологической документации.

Реализация описанных этапов преобразования информации в САПРТП позволит повысить уровень автоматизации расчёта параметров ТП. Связь геометрической информации о чертеже детали с комплектом технологической документации через переменные позволит автоматически при изменении чертежа детали вносить изменения в технологическую документацию. Это существенно сократит время на разработку ТП и в конечном счёте приведёт к снижению себестоимости изготовляемой детали.

Библиографические ссылки

1. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / под. ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова и др. 5-е изд., исправл. М.: Машиностроение-1, 2003. 944 с.

2. **Кован В.М.** Расчёт припусков на обработку в машиностроении. М.: Машгиз, 1953. 207 с.

3. **Data-Base** Management Sustem Requirements, A Report of the Joint GUIDE-SHARE Data-Base Requirements Group, Nov. 1971.

4. **Dean A.L.** Jr. Data Privacy and Integrity Requirements for Online Data Management Systems, Proc. 1971 ACM SIGFIDET Workshop on Data Description, Access and Control.

5. **Мартин Дж.** Организация баз данных в вычислительных системах [под ред. И.М. Андреева]. М.: Мир, 1980. 662 с.

6. **Кахро М.И., Калья А.П., Тыугу Э.Х.** Инструментальная система программирования ЕС ЭВМ (ПРИЗ). М.: Финансы и статистика, 1988. 181 с.

7. **Тыугу Э.Х.** Концептуальное программирование: М.: Наука, 1984. 256 с.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала.
При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 681.518

Н.В. Лукьянова, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
nluk@mail.ru

МОДУЛЬНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛОЖЕНИЯ ВИНЕРА

Рассмотрен модульный метод моделирования. Исследованы способы практической реализации процедуры идентификации, результатом которой являются наборы оптимальных ядер Винера, определяемые взаимокорреляционным методом. Представлены и обоснованы требования, учитываемые при реализации процедуры идентификации.

Ключевые слова: полунатурное моделирование; идентификация; ядра Винера; требования к процедуре идентификации.

The new modular modeling method is considered. Practical implementation means of the identification procedure, the result of which represent a set of optimal Wiener nuclei defined via an mutual correlated method are researched. Demands to be considered in the implementation of identification procedures are represented and substantiated.

Key words: HIL; identification; Wiener nucleus; identification procedure requirements.

Введение. В последние десятилетия резкое усложнение разрабатываемых систем и комплексов привело к расширению круга предварительных исследований и увеличению объёмов и сроков натурных испытаний.

Отечественный и зарубежный опыт показал, что натурные испытания занимают до 50 % времени, необходимого для конструирования и изготовления опытных образцов, а их стоимость достигает 40 % от стоимости разработок. Затягивание сроков испытаний приводит к моральному старению испытываемой системы на момент её создания.

Сокращение сроков проведения НИОКР и освоение разработок представляется возможным при широком внедрении моделирования в технологический процесс [1—3]. Практика показывает, что качество и сроки проектирования в значительной степени зависят от полноты функционального анализа и правильного выбора аппаратных единиц разрабатываемой системы уже на этапе предварительных исследований. На этом этапе желательно иметь как можно более полную информацию о динамических характеристиках разрабатываемой системы и условиях её эксплуатации. Однако провести аналитические исследования современных информационно-управляющих систем практически не удаётся. Поэтому неотъемлемой частью проектирования становится имитационное моделирование, причём оно должно применяться не только при подготовке технических предложений и требований к создаваемому образцу, но и на этапах эскизного и технического проектирования, при отработке образцов в условиях их функционирования, а также на этапе испытаний (сопровождающее моделирование).

Следует отметить, что на этапе отработки образцов особое место занимает полунатурное моделирование с заменой ряда звеньев контура управления изготовленными блоками реальной аппаратуры. На стадии разработки системы оно позволяет уточнить основные характеристики уже изготовленных элементов, а также выбрать оптимальные характеристики и параметры проектируемых элементов. После завершения разработки полунатурное моделирование способствует проведению весьма полных исследований системы в целом, чтобы сократить круг вопросов, выносимых в дальнейшем на испытания.

Полунатурное моделирование. При полунатурном моделировании аппаратура управления и регулирования дополняется вычислительной машиной (аналоговой или цифровой), воспроизводящей в реальном времени по заданным управлениям поведение той части системы управления или регулирования, работа которой не может быть воспроизведена в лабораторных условиях. Связь вычислительной машины с натурной частью осуществляется с помощью специальных устройств сопряжения, коэффициенты передачи которых определяют

выбор масштабных коэффициентов преобразования соответствующих переменных.

Возможны различные варианты построения полунатурной модели:

с одностепенным стендом, например, для оценки гироскопических элементов системы наведения;

с двухстепенным стендом для отработки элементов и систем управления и наведения в полном диапазоне их рабочих частот, а также для оценки устойчивости гироскопической следящей системы;

с трёхстепенным стендом, позволяющим воспроизводить угловые перемещения объекта по курсу, крену и тангажу;

с пятистепенным стендом, представляющим собой объединение двух- и трёхстепенных стендов.

Метод полунатурного моделирования с динамическими стендами позволяет воспроизводить в лабораторных условиях режимы работы, близкие к реальным, и тем самым помогает решить следующие вопросы:

исследование динамики систем управления и их элементов;

выбор оптимальных параметров с точки зрения точности системы;

исследование поведения объекта в полёте и перекрёстные связи;

исследование надёжности автоматических систем и прогнозирование ресурса;

отладка и испытания системы при контрольных, приёмосдаточных испытаниях и перед лётными испытаниями.

Динамический стенд оборудуется следящими системами с чрезвычайно высокими статическими и динамическими характеристиками, значительно превышающими характеристики моделируемой системы, с тем чтобы при моделировании не вносились искажения, обусловленные ошибками слежения в рабочей полосе частот исследуемого объекта. Точность следящей системы динамического стенда должна находиться в пределах точности вычислительных устройств.

Методы полунатурного моделирования можно классифицировать в зависимости от целей исследования:

для оценки элементов системы управления в разомкнутой цепи;

моделирования в замкнутом контуре;

для анализа и синтеза системы;

Моделирование осуществляется по замкнутому контуру, стенд, прежде всего, используется как вычислительное устройство с высокими характеристиками, т. е. в этом случае динамический стенд входит в цепь математического моделирования сложной системы. Стенд с управляющей ЭВМ представляет собой мощное вычислительное устройство для решения ряда сложных проблем, связанных с анализом и синтезом системы управления, т. е. позволяет осуществить полное пространственное моделирование траектории управляемого объекта, инерциальные элементы которого устанавливаются на стенде, для выбора оптимальной структуры системы наведения.

При разработке системы наведения используется имитатор цели, воздействующий, например, на чувствительные элементы головки самонаведения. Установленные на рулях датчики углов отклонения выдают сигналы в модель, осуществляя замыкание контура моделирования.

Имитаторы цели бывают неподвижными и с движущейся целью, которая в обоих случаях представляет собой точечный источник, установленный на расстоянии, зависящем от длины линии задержки.

С помощью неподвижных имитаторов цели можно определять влияние шума цели на устойчивость полной ракеты (ракеты с системой наведения); проверять устойчивость ракеты с новыми элементами; исследовать влияние минимальной интенсивности сигнала на устойчивость полной ракеты.

С помощью движущегося имитатора можно выполнить все исследования, проводимые по замкнутому контуру совместно с реальной головкой самонаведения, которая целиком устанавливается на динамическом стенде [4].

Управляющим и моделирующим центром схемы является ЭВМ (аналоговая или цифровая), которая выполняет математическое моделирование части системы и управляет динамическим стендом, имитирующим воздействия на реальную аппаратуру. Сигналы с реальной аппаратуры вновь поступают на ЭВМ, которая должна работать в реальном времени, в случае использования ЦВМ — необходима аппаратура сопряжения сигналов.

В зависимости от области применения полунатурного моделирования в качестве блоков сопряжения программной и аппаратной частей кроме динамических стендов используются электрогидравлические преобразователи, генераторы модулируемых несущих колебаний, модуляторы, нелинейные преобразователи.

Практика показывает, что основной круг задач моделирования решается по схеме с зам-

кнутым контуром. Организация и проведение моделирования по такой схеме сопряжены с большими техническими трудностями:

1. Сложные системы являются обычно многоконтурными. Полунатурное моделирование такой системы осуществляется последовательным моделированием системы с наращиваемыми контурами управления, что приводит к многократному использованию аппаратуры контура и снижению точности моделирования, а также к зависимости результатов моделирования на каждом шаге. Тогда отказ любого элемента схемы приводит к отказу модели полной системы. Таким образом, безотказность работы схемы зависит от безотказности каждого её элемента.

2. Полунатурное моделирование должно протекать в реальном масштабе времени. Эффективность моделирования в реальном времени определяется задержкой сообщений перед их обработкой, вероятностью потери сообщений, необходимостью подключения дополнительных вычислительных средств.

Поэтому одной из важных проблем полунатурного моделирования является проблема оперативного управления вычислительным процессом в реальном времени и обеспечения быстродействия вычислительных средств.

3. Необходимость использования динамических стендов, повышающих эффективность полунатурного моделирования, сопряжена с техническими трудностями, связанными:

с разработкой высокоточных следящих систем, низкая точность которых является существенным источником ошибок моделирования;

со сложностью наладки стенда;

с его инерционностью, приводящей к ошибкам при моделировании пролёта ракеты на малых расстояниях от цели;

с влиянием на результаты исследования отражений высокочастотных сигналов от местных предметов.

4. Трудоёмкой задачей является разработка точных и стабильных устройств, входящих в состав блоков сопряжения программной части системы и реальной аппаратуры.

Таким образом, пользуясь существующей методикой полунатурного моделирования, получить оценки динамических параметров многоконтурных систем достаточно сложно.

Модульный метод полунатурного моделирования сложных динамических систем. В связи с трудностями в организации и проведении полунатурного моделирования перед разработчиками ставится цель — значительно сократить объём исследований с реальной аппаратурой для того, чтобы повысить надёжность и точность полунатурного модулирования. Это возможно при изменении схемы моделирования таким образом, чтобы основной объём исследований проводился на математических моделях.

Вместе с тем должна быть решена задача выбора математического аппарата для адекватного описания реальной аппаратуры.

В основе модульного моделирования лежит переход от исходной сложной системы к исследованию таких более простых систем, по совокупным свойствам которых можно восстановить точно или приближённо свойства исходной системы. Тогда разрабатываемая система представляет собой совокупность модулей. Оценка качества модулей и системы в целом проводится на основе математических моделей, идентифицированных по результатам полунатурного моделирования в лабораторных условиях или натурных испытаний.

Модульное моделирование включает этапы:

ориентации и декомпозиции исходной системы на фактически замкнутые подсистемы (реальные модули); расчленённая система представляется набором независимых опытных образцов, выделенных в реальные модули, и программной частью системы, не воспроизведённой реально;

идентификации реальных модулей на всех этапах разработки системы подачей тестирующего сигнала от имитатора воздействий среды; в реальных модулях исследуется влияние окружающей среды на поведение объекта для определения его адекватной математической модели;

оценки свойств системы после сборки программных модулей в систему.

Программный модуль представляет собой пакет прикладных программ моделирования подсистем. В программных модулях дорабатывают модели реальных модулей до получения адекватной модели системы, на которой проводятся исследования. Отладка параметров системы осуществляется адаптацией программной части системы или моделей подсистем.

Таким образом, чтобы получить оценки параметров системы по модульному методу, необходимо провести определенное число циклов моделирования многократным просчётом на ЭВМ, используя только математические модели. Кроме того, отладка системы осуществляется сопряжением математических моделей

подсистем, т. е. реальные процессы заменяются математическими, снижаются требования к обеспечению вычислительного процесса в реальном времени [5].

Рассмотрим задачу выбора высокоэффективных методов моделирования. Приступая к исследованию динамических систем, являющихся большей частью нелинейными, для которых принцип суперпозиции не выполняется, важно установить вид тестирующего сигнала.

Н. Винер предложил в качестве универсального теста броуновское движение, которое обладает общей инвариантностью к группе сдвигов, так как для этого процесса имеет место полная независимость приращений для различных моментов времени.

Поскольку винеровский процесс, являющийся математической моделью броуновского движения, представляет собой универсальный тест, нет необходимости для полного описания системы определять выходной сигнал от всех возможных входных воздействий.

В литературе подробно рассмотрены свойства винеровского процесса. Процесс, являющийся обобщённой производной от броуновского движения, называется белым шумом.

Метод белого шума применим к широкому классу систем, которые являются стационарными и имеют конечную память, т. е. время установления стационарного состояния системы конечно. Это означает, что из рассмотрения исключаются системы, характеристики которых изменяются со временем, и системы, имеющие бесконечную память. Однако ни одно из указанных ограничений не является, в сущности, абсолютно строгим. Если время, за которое изменяются свойства системы, значительно превышает постоянные времени, характеризующие ослабление реакции, то метод оказывается весьма эффективным [6].

Задача моделирования реальной системы сводится к построению адекватной модели такой, чтобы среднеквадратическое отклонение выхода реального объекта $y(t)$ от выхода его модели $\hat{y}_n(t)$ было минимальным.

Тогда результатами идентификации реальной системы является набор ядер Винера $\{h_n\}$, который минимизирует

$$e^2(t) = M\left[\left|(y(t) - \hat{y}_n(t))^2\right|\right]$$

или (1)

$$e^2(t) = M\left[\left|\left(y(t) - \sum_{n=0}^{\infty} G_n[h_n, x(t)\right)^2\right|\right].$$

Если ввести многомерные полиномы Эрмита, обдающие свойством ортогональности, то полиномы Винера примут вид

$$G_n[h_n, x(t)] = \int\ldots\int_0^{\infty} h_n(\tau_1,\ldots,\tau) \times \times H^{(n)}[x(t-\tau_1),\ldots,x(t-\tau_n)]d\nu_\tau, \quad (2)$$

где R_{xx} — корреляционная функция процесса $x(t)$; $d\nu_\tau = d\tau_1 d\tau_2 \ldots d\tau_n$.

Один из путей решения задачи минимизации заключается в использовании стандартного метода вариационного исчисления [1].

Для того чтобы на практике пользоваться выражениями, определяющими в явном виде ядра Винера, следует на вход моделируемой системы подать идеальный белый шум. Реально это осуществить невозможно, поэтому в расчётах ядер неизбежно появляются ошибки. Однако при оптимальном выборе параметров идентификации, эти ошибки можно свести к минимуму.

Оптимальный набор ядер $\{h_n\}$ полностью описывает динамику реальной аппаратуры. Полученные значения ядер $\{h_n\}$ используются для последующего моделирования и синтеза управления, расчёта точности.

Обоснование требований, предъявляемых к процессу идентификации. Рассмотрим вопросы практической реализации процедуры идентификации, результатом которой являются наборы оптимальных ядер Винера, определяемые взаимокорреляционным методом [6].

Задачу определения ядер Винера можно считать корректной, если на вход исследуемой системы подаётся идеальный белый шум. Но поскольку практически такой процесс не реализуем, то возникает проблема выбора оптимальных параметров тестирующего сигнала с тем, чтобы он воспринимался системой как белый шум. Для разрешения этой проблемы необходима информация о соответствующих характеристиках системы. Полученная информация определяет параметры процедуры идентификации, оптимальный выбор которых является средством повышения точности эксперимента [7].

Этап предварительных исследований реальной аппаратуры включает следующие операции [8]:

1. Определение входов и выходов реальной аппаратуры и динамического диапазона сигналов. Необходимо знать все входы, которые влияют на изучаемую реакцию, определяемые

предварительным тестом. Затем определяется динамический диапазон изменения амплитуды теста, диапазон которой должен перекрывать наиболее информативный динамический диапазон входных сигналов исследуемой аппаратуры.

2. Проверка стационарности реальной аппаратуры, так как метод белого шума применим только к таким системам. Поскольку входной сигнал — это стационарный случайный процесс, то любые нестационарности аппаратуры системы приводят к нестационарности её реакции.

3. Исследование источников шума для проведения соответствующей фильтрации реализаций до определения по ним ядер Винера. Шум, не зависящий от тестирующего сигнала или реакции аппаратуры, обычно не принимается во внимание, так как взаимокорреляционный метод определения ядер Винера значительно снижает его влияние.

4. Ориентировочное определение полосы пропускания реальной аппаратуры для выбора частотного диапазона тестирующего сигнала. Полоса пропускания определяет частотный диапазон, в котором исследуемая аппаратура реагирует на входное воздействие. Приближённо её можно определить, тестируя систему с помощью синусоидальных сигналов, импульсных воздействий или с помощью широкополосного белого шума.

5. Выбор частотного диапазона тестирующего сигнала в виде широкополосного белого гауссова шума. Для получения точных оценок характеристик исследуемой аппаратуры важно правильно выбрать частотный диапазон тестирующего сигнала $f_{\delta\omega}$, который определяется полосой пропускания аппаратуры. Но чтобы входной гауссов процесс для системы был белым шумом, частотный диапазон должен полностью перекрывать полосу пропускания системы, а он сам в пределах этой полосы должен обладать постоянной спектральной плотностью.

Таким образом, на исследуемую аппаратуру подаётся тестирующий сигнал с ограниченной постоянной спектральной плотностью. Нижнее ограничение связано с конечной продолжительностью эксперимента, а верхнее — с тем, что с повышением частоты уровень амплитуды реакции системы понижается. Поэтому верхний диапазон определяется наивысшей частотой, при которой реакция системы может быть обнаружена на фоне шума. Вследствие ограниченности спектральной полосы тестирующего сигнала оценки ядер Винера являются смещёнными. Дисперсия их оценок обратно пропорциональна длительности эксперимента и прямо пропорциональна спектральной полосе широкополосного белого гауссова шума.

Следовательно, расширение диапазона спектральной полосы за пределы полосы пропускания системы уменьшает смещение оценок, но вместе с тем увеличивает их дисперсию. Выбрать оптимальный частотный диапазон тестирующего сигнала, ориентируясь на полосу пропускания, возможно только для линейных систем. Для нелинейных систем данная характеристика не является информативной. Для получения уточнённых оценок ядер разработан алгоритм дифференцированного подхода к выбору оптимального частотного диапазона тестирующего сигнала, т.е. для каждого порядка рассчитываемых ядер предлагается определять свой оптимальный частотный диапазон теста $f_{\delta\omega}$.

Реализация ограниченного по полосе цифрового белого шума может быть получена из реализаций цифрового гауссова процесса, пропущенного через обычный RC-фильтр нижних частот.

Таким образом, задача выбора частотного диапазона тестирующего сигнала сводится к выбору таких параметров рекуррентного фильтра, при изменении которых дисперсия реакции модели практически не изменяется.

6. Определение интервала дискретности. Применение ЭВМ в задачах идентификации приводит к оперированию дискретными величинами. Точность дискретизации зависит от выбора интервала квантования по времени Δt. Согласно теореме Котельникова Δt определяется граничной частотой пропускания объекта исследования. Для каждого порядка ядра выбирается свой интервал квантования.

7. Определение памяти системы (времени затухания переходного процесса) для выбора диапазона временных задержек при вычислении ядер реальной аппаратуры и выбора времени эксперимента.

Системы с бесконечной памятью исключаются из рассмотрения. Глубина памяти μ динамической системы — это интервал времени, необходимый для того, чтобы реакция системы на входное воздействие, поданное в момент времени $t - \mu$, полностью исчезла в момент времени t.

Ядра, рассчитанные на интервале $0 \leqslant \tau_i \leqslant \mu$, несут реальную информацию о системе. Этим

интервалом определяется время взаимной корреляции между входным воздействием и реакцией системы. Исходя из дифференцированного подхода к выбору частотного диапазона белого гауссова шума, глубина памяти для ядер различных порядков должна быть различной.

Как известно взаимокорреляционная функция первого порядка с точностью до нормирующего множителя — ядро первого порядка. Таким образом, глубина памяти ядра первого порядка определяется временем взаимной корреляции первого порядка или по импульсной реакции системы.

После $\tau_i > \mu$ все значения ядер равны нулю. Аналогично определяется память для ядер второго порядка по взаимной корреляции второго порядка и т. д. В случае безынерционной системы память равна нулю и количество подсчитываемых точек для ядер всех порядков равно единице.

8. Определение длительности эксперимента по идентификации реальной аппаратуры с помощью белого шума.

Поскольку в первом приближении дисперсия оценок ядер обратно пропорциональна длительности записи теста, предельная длительность определяется либо вычислительными возможностями, либо временем стационарности исследуемой аппаратуры. Но тогда получаем противоречивые требования. Для помехоусточивости необходимо, чтобы длительность записи была большой. Вследствие существующей нестационарности аппаратуры интервал наблюдения лучше выбрать короче. На практике интервал наблюдения выбирают превышающим время затухания переходного процесса, так как малый интервал наблюдения не позволяет описать исследуемую аппаратуру статистическими методами и применим только при больших соотношениях сигнал/шум. Как правило, время наблюдения T выбирают как сумму времени затухания переходного процесса в объекте и максимального времени корреляции входного сигнала.

Конечность времени наблюдения вносит погрешность в определение корреляционных функций. Данная погрешность на каждой частоте имеет порядок $\frac{1}{\omega_\nu T}$, где ω_ν — круговая частота ν-й гармоники. Следовательно, влияние конечности T целесообразно оценивать по низшей гармонике.

Выводы. Винеровский подход позволяет рассматривать исследуемую аппаратуру как «чёрный» ящик, идентифицировать её, учитывая все внутренние реальные процессы, возможно и неизвестные, и строить по полученным характеристикам математическую модель, имеющую наперёд заданное приближение к реальной аппаратуре.

Сформулирован комплекс требований, предъявляемых к процессу идентификации.

Используя ортогональные функционалы Винера, можно получить адекватную модель за одну достаточно длинную реализацию, что позволяет значительно сократить технические затраты на отладку модели.

Библиографические ссылки

1. **Мармарелис П.** Анализ физиологических систем. Метод белого шума. М.: Мир, 1982. 375 с.

2. **Неусыпин К.А., Мешков Н.А., Пищулин В.И.** Исследование систем управления: учеб. пособие. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 124 с.

3. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6. С. 40—44.

4. **Неусыпин К.А., Кэ Ф., Дзя Л.С.** Управление и наведение ракет, основанное на теории дифференциальной геометрии // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 1. С. 16—20.

5. **Цибизова Т.Ю.** Методы идентификации нелинейных систем управления // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. URL: http://www.science-education.ru/121-1791

6. **Лукьянова Н.В., Кузнецов И.А.** Идентификация нелинейных динамических систем на основе разложения функционалов методом Винера: материалы конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС — 2014), СПб. 2014.

7. **Лукьянова Н.В.** Идентификация нелинейных систем на основе разложения функционалов Винера в системе LABVIEW. Сб. Актуальные вопросы фундаментальных наук: тр. междунар. науч. конф. М., 2014. С. 167—172.

8. **Лукьянова Н.В.** Требования, предъявляемые к процессу идентификации на основе разложения функционалов Винера: сб: Достижения вузовской науки. Тр. междунар. науч.-практич. конф. М., 2014. С. 183—188.

УДК 536.5; 617-7

И.А. Бурков, А.В. Пушкарёв, А.В. Шакуров
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Д.И. Цыганов, д-р техн. наук, проф.
(Российская медицинская академия последипломного образования, г. Москва)

pushkarev@bmstu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МАЛОИНВАЗИВНОГО КРИОЗОНДА

В последние годы в Российской Федерации стали более часто применяться криохирургические комплексы для различных видов операций. Действие установок основано на использовании низких температур на патологически измененные зоны биологической ткани или органа с целью их гибели. Непосредственное пенетрационное воздействие на целевые области ведётся через криозонды малого диаметра, внутри которых циркулирует рабочее вещество.

Исследовано температурное распределение на рабочей поверхности малоинвазивного криозонда для дальнейшего применения полученных данных при прогнозировании результатов хирургического вмешательства. Разработан экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования при различных режимах подачи рабочего вещества. По итогам работы сделан вывод о целесообразности использования полученных данных при моделировании и прогнозировании криохирургических операций.

Ключевые слова: малоинвазивный криозонд; криодеструкция; термометрия.

In recent years in the Russian Federation are more often used cryosurgical systems for different types of surgical operations. The facility operation is based on the utilization of the low temperatures influence on the pathological changed zones of the biological tissues or organ for the purpose of their death. The direct penetration influence to the target area is fulfilled through small diameter cryoprobes. Inside of cryoprobes circulates the working substance. The temperature distribution on the working surface of minimally invasive cryoprobe for further use of the received data in predicting the surgery results is researched. An experimental stand which allows you to conduct research at various modes of the working substance supply, is developed. According to the results draw a conclusion about utilization suitability of the received information at the cryosurgery simulation and prediction.

Key words: minimally invasive cryoprobe; cryodestruction; thermometry.

Первое поколение криохирургического оборудования сформировалось в 1960-х гг. В качестве криоагента использовался преимущественно жидкий азот. В 1990-х гг. расширилось применение оборудования на основе сжатого газа, что позволило миниатюризировать инструмент.

Всё многообразие криохирургических установок имеет смысл разделить на группы по определённым признакам. Во-первых, по методу воздействия на целевые области биоткани: поверхностное или пенетрационное, во-вторых, по принципу охлаждения: использование теплоты фазового перехода рабочего вещества или эффекта дросселирования газов.

Сегодня в Российской Федерации внедряются технологии многозондовой малоинвазивной криохирургии, которые применяются в первую очередь в урологии. Криометод имеет свои преимущества и недостатки. Преимущества по сравнению с традиционными операциями: бескровность, безболезненность, краткий срок пребывания в стационаре. После криодеструкции не наблюдается заметной общей реакции организма, а регенерация протекает быстро и часто имеет органотипический характер [1]. Серьёзным недостатком является сложность прогнозирования результатов криохирургического воздействия. Одной из важнейших задач для устранения данного недостатка является исследование температурного распределения на рабочей поверхности криозонда для дальнейшего применения полученных данных в теплофизическом расчёте.

Необходимо учитывать, что процесс криовоздействия нельзя рассматривать и, в том числе, рассчитывать без учёта применяющегося оборудования. В качестве объектов изучения выбраны малоинвазивные криозонды, входящие в состав аппарата Galil SeedNet, при помощи которого проводятся операции по удалению предстательной железы и почек. Имеется возможность использования целого

ряда различных по эффективности зондов. В РФ одобрены к применению два типа: IceSeed 1.5 и IceRod 1.5 (рис. 1).

Приведённые зонды с внешним диаметром не более 1,5 мм позволяют осуществить вмешательство в организм с минимальной потерей крови. Обычно используется несколько криозондов, размещаемых определённым образом по рядам в операционной зоне [2]. Эти зонды вводятся в ткань предстательной железы через шаблонную решетку или же в ткань почки по данным, получаемым с УЗИ и предоперационного обследования [3]. По конструкции они представляют собой миниатюрные теплообменники, в которых прямой поток газообразного аргона охлаждается обратным и дросселируется. Следует отметить, что эффективность таких теплообменников сильно зависит от давления газа. При давлении подачи газа 10 МПа эффективность значительно ниже, чем при давлении больше 20 МПа [4]. На оборудовании Galil SeedNet давление подачи аргона во время операции составляет 240 ± 2 атм.

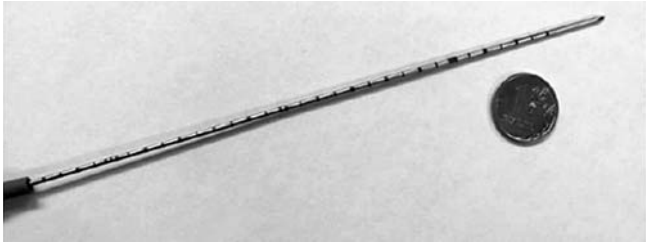


Рис. 1. Малоинвазивные криозонды

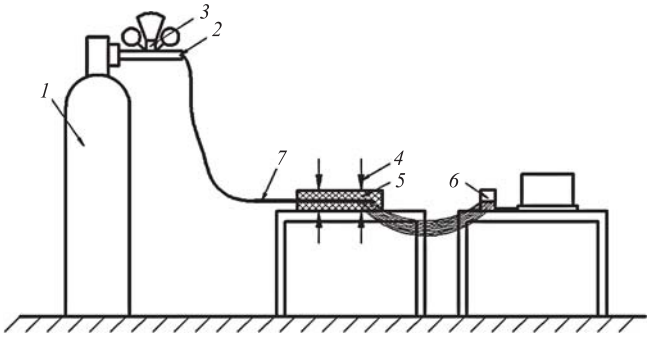


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

1 — газовый аргоновый баллон высокого давления; *2* — проточная система; *3* — редуктор; *4* — струбцина; *5* — теплоизоляционные листы; *6* — измерительный модуль; *7* — криозонд

Таблица 1

Элементы экспериментального стенда

№ элемента (см. рис. 1)	Название	Функции
1	Газовый аргоновый баллон высокого давления	Подача аргона высокого давления в проточную систему
2	Проточная система	Приспособление для соединения газового баллона и криозонда
3	Редуктор	Регулирование давления подачи аргона
4	Струбцина	Фиксация криозонда
5	Теплоизоляционные листы	Теплоизоляция рабочей поверхности криозонда от внешних теплопритоков
6	Измерительный модуль	Измерение температуры на поверхности криозонда в установленных точках
7	Криозонд	Объект исследования

Как уже отмечалось выше, очень важно иметь данные по температурному распределению на рабочей поверхности криозонда для постановки расчёта тепловых полей и прогнозирования хирургического вмешательства.

Для этой цели разработан экспериментальный стенд (рис. 2), состоящий из 7 основных элементов (табл. 1).

Газовые баллоны могут хранить аргон при давлении до 300 атм. (рис. 3). При этом чистота

Рис. 3. Газовый баллон и редуктор

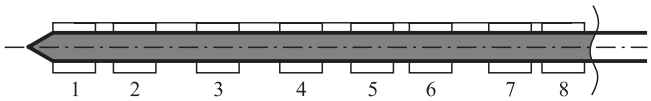


Рис. 4. Расстановка датчиков температуры

аргона, необходимая для успешного проведения процедуры, должна быть 99,998 % и выше.

В экспериментальном стенде используются криозонды типа IceRod 1,5, длина рабочей поверхности которых принималась 35 мм. Расстановка датчиков температуры, входящих в измерительный модуль, осуществлялась через равные отрезки по всей рабочей длине (рис. 4).

Последовательность проведения эксперимента состоит из следующих этапов. Сначала проверяется давление рабочего газа аргона в баллоне с помощью манометра, входящего в состав редуктора. Согласно схеме расстановки происходит фиксация криозонда и датчиков температуры между теплоизоляционными листами с использованием струбцины. Запускается измерительный модуль и снимаются текущие показания датчиков температуры. Открывается вентиль баллона, при помощи редуктора настраивается давление подачи аргона, и начинается эксперимент. Все показания датчиков записываются на персональный компьютер в режиме реального времени.

Также была проведена серия опытов при различном давлении подачи аргона. Результаты предварительных экспериментов при разных вариантах подачи при выходе на стационарный режим представлены в табл. 2, и приведены усреднённые значения температур после обработки серии измерений.

Таблица 2

Распределение температуры по рабочей длине криозонда

Точки (см. рис. 4)	Расстояние от конца зонда, мм	Режим подачи рабочего газа аргона (давление подачи, атм)	
		100	160
		Температура, °С	
1	0	−11,8	−14,4
2	5	−17,4	−31,6
3	10	−33,1	−45,8
4	15	−47,7	−62,5
5	20	−60,5	−107,1
6	25	−49,5	−56,5
7	30	−39,4	−44,2
8	35	−40,8	−47,8

Из полученных данных можно сделать ряд выводов. Во-первых, криозонд без тепловой нагрузки, т. е. в теплоизолированных листах, быстро выходит на стационарный режим. Во-вторых, распределение температуры по поверхности криозонда носит непостоянный характер. В-третьих, аргон при дросселировании не попадает в парожидкостную область при исследуемых режимах, т. е. не меняет фазового состояния. Из последнего вывода следует, что мощность теплового отвода от целевого охлаждаемого объекта можно повысить повышением эффективности теплообменника в криозонде. Для этого необходимо повысить интенсификацию теплообмена между прямым и обратным потоком рабочего вещества. Но это уже тема отдельного исследования, которое планируется провести в дальнейшем.

В результате выполненной работы были получены предварительные данные по температурному распределению на рабочей поверхности малоинвазивного криозонда, т. е. граничные условия 1-го рода, которые можно использовать в первом приближении для теплофизического расчёта с целью прогнозирования криохирургического воздействия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-12051 офи_м.

Библиографические ссылки

1. **Беляев М.К.** Метод криодеструкции в лечение келоидных рубцов у детей // Медицина в Кузбассе. 2007. Спецвыпуск № 1. С. 27—28.

2. **Цыганов Д.И., Пушкарёв А.В., Морозова Н.В.** Изучение возможностей применения инвазивных термосенсоров для контроля температуры в биоткани // Междунар. научно-практ. конф. «Биотехнология и качество жизни», Москва, Мэрия Москвы, 18—20 марта 2014. М.: ЗАО «Экспо-биохим-технологии», РХТУ им. Д.И. Менделеева. С. 185—186.

3. **Васильев А.О., Говоров А.В., Пушкарёв А.В., Цыганов Д.И., Шакуров А.В.** Теплофизическое моделирование криохирургической операции на примере рака предстательной железы // Технологии живых систем. Т. 11. № 4. 2014. С. 47—53.

4. **Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Young-Don Choi.** A Numerical Study of the Performance of a Heat Exchanger for a Miniature Joule-Thomson Refrigerator, Cryocoolers 15,edited by S.D. Miller and R.G. Ross, JR. International Cryocooler Conference, Inc., Boulder, CO, 2009. P. 379—386.

УДК 629.7

Г.П. Шибанов, д-р техн. наук, проф.
(Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова, г. Ахтубинск)

gpshibanov@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ОБЛИКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрены многокритериальный выбор и упорядочение объектов на примере авиационной техники. Даны рекомендации по определению коэффициентов относительной важности критериев, используемых в процессе обликовых исследований, и по использованию различных методов решения многокритериальных задач. Предложены алгоритмы многокритериального выбора объектов авиационной техники.

Ключевые слова: современные технологии; обликовые исследования; авиационная техника; многокритериальные задачи; алгоритмы; критерии.

Objects multi-criteria selection and ordering are considered on the aircraft example. Recommendations for coefficients determination of the criteria relative importance of the criteria used in the process of apect research, and for the different methods utilization for solving multicriteria tasks. The algorithms of multi-criteria selection of the aircraft objects are proposed.

Key words: modern technologies; shape research; aviation equipment; multicriteria tasks; algorithms; criteria.

Обликовые исследования являются преддверием к обоснованию тактико-технического задания на вновь создаваемый авиационный комплекс (АК). В процессе исследований из ряда вариантов АК, каждый из которых характеризуется некоторым множеством параметров (часто противоречивых), для лица, принимающего решение (ЛПР), необходимо выбрать такой, который бы был предпочтительным.

В течение многих лет теоретическую основу обликовых исследований и программного планирования развития авиационной техники составляли традиционные модели исследования операций, которые, несмотря на свою математическую строгость и наработанную алгоритмическую базу, имеют один и весьма существенный недостаток — использование одномерных критериев качества исследуемых авиационных комплексов.

В реальных задачах, приближённых к жизни и практике, такой подход зачастую оказывается неприемлемым. Стремление учесть в моделях больше факторов делает их настолько сложными и многоаспектными, что использование их практически нереализуемо [1].

При этом многие задачи обоснования развития авиационной техники переводятся в разряд многокритериальных и требуют для своего решения соответствующих методов и подходов. Теоретическую основу для решения таких задач составляют методы многокритериального выбора и упорядочения объектов [2, 3].

Многокритериальный выбор и упорядочение объектов авиационной техники. В общем виде задача многокритериального выбора и упорядочения объектов может быть сформулирована как задача, которую решает ЛПР, имея перед собой множество объектов A (альтернатив, вариантов и т. д.), каждый из которых оценивается совокупностью критериев G (показателей). При этом ЛПР на основе его представлений об относительной важности критериев выбирает один наилучший объект (задача выбора) или все рассматриваемые объекты располагает в определённой последовательности — от самого лучшего к самому худшему (задача упорядочения).

Для получения оценок коэффициентов относительной важности критериев и некоторых оценок объектов по ряду критериев при необходимости привлекается группа экспертов.

Задачу упорядочения объектов авиационной техники можно представить в виде

$$\underset{(P,\,I)}{\mathrm{opt}}\{g_1(a_i), g_2(a_i), \ldots, g_m(a_i) | a_i \in A\},$$

где $A = \{a_1, a_2,..., a_n\}$ — конечное множество объектов; $G = \{g_1, g_2,..., g_m\}$ — конечное множество критериев; $g_j(a_i)$ — количественная оценка i-го объекта ($i = 1, 2, ..., n$) по j-му критерию ($j = 1, 2, ..., m$); P — бинарное отношение предпочтения, т. е. a_iPa_j, если объект a_i предпочтительнее a_j; I — бинарное отношение неразличимости, т.е. a_iIa_j, если объект a_i неразличим с a_j.

В результате решения такой задачи на множестве сравниваемых объектов A должны быть установлены бинарные отношения пред-

почтения P и неразличимости I. При построении этих отношений оптимальным образом (смысл знака Opt) должна быть использована информация об оценках объектов по отдельным критериям и учтена относительная важность критериев, которую им придаёт ЛПР.

В результате решения задачи упорядочения на множестве оцениваемых объектов должно быть установлено отношение нестрогого порядка (квазипорядок), которое выше обозначено как (P,I) и которое является объединением отношений P и I, т. е. $P, I = P \cup I$.

Решив задачу многокритериального упорядочения, получим и решение задачи выбора. Можно выделить подмножество недоменируемых решений, а затем из данного подмножества выбрать наилучший объект. При этом объём вычислений может быть существенно сокращён.

Задачу выбора наиболее предпочтительного объекта авиационной техники из упорядоченного ряда объектов формально можно представить в виде

$$\underset{(a_i)}{\mathrm{opt}}\{g_1(a_i), g_2(a_i), \ldots, g_m(a_i) | a_i \in A\},$$

или в других обозначениях

$$\mathrm{Pref}\{g_1(a_i), g_2(a_i), \ldots, g_m(a_i) | a_i \in A\},$$

где Pref — обозначает выбор наиболее предпочтительного объекта (используется сокращение от английского слова preferable — предпочтительный).

При решении рассматриваемой многокритериальной задачи в большинстве автоматизированных систем можно условно выделить пять этапов.

Этап 1. Построение модели (формализация задачи).

На данном этапе ЛПР уясняет для себя содержательную постановку конкретной задачи: формирует множество объектов (альтернативных вариантов) и множество критериев для их оценки, определяет способ получения оценок и соответствующие измерительные шкалы. Работы первого этапа выполняются ЛПР неформально, в основном интуитивно, без использования каких-либо средств автоматизации и предшествуют наполнению задачи конкретными данными [2].

Этап 2. Получение оценок объектов по каждому из критериев.

Оценки объектов (альтернатив) по отдельным критериям, в зависимости от специфических особенностей конкретной задачи, могут быть получены из документов, на основе технических измерений и испытаний, моделирования, расчётным путём или в результате экспертного опроса.

Для последующего применения формальных методов желательно, чтобы оценки носили количественный характер, т. е. измерялись в абсолютной шкале, в шкале интервалов отношений или разностей [4].

Результатом второго этапа является получение матрицы

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1m} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{n1} & g_{n2} & \cdots & g_{nm} \end{bmatrix},$$

где g_{ij} — оценка i-го объекта по j-му критерию, ($i = 1, 2, \ldots, n$; $j = 1, 2, \ldots, m$).

Этап 3. Определение коэффициентов относительной важности критериев W.

Данные коэффициенты могут быть назначены ЛПР непосредственно или определены по результатам обработки матриц парных сравнений. Наиболее известны и широко используются три основных метода обработки матриц парных сравнений [5]: наименьших квадратов, неполных строчных сумм и собственных значений.

В результате третьего этапа определяется вектор коэффициентов относительной важности критериев

$$W = (w_1, w_2, \ldots, w_m), \ \sum_{j=1}^{m} w_j = 1.$$

Этап 4. Решение рассмотренной выше задачи выбора или упорядочения одним из формальных методов.

В случае задачи многокритериального выбора, прежде чем воспользоваться одним из формальных методов, можно сократить объём вычислительной работы за счёт выделения множества недоминируемых решений (множества Парето).

Результатом четвёртого этапа является указание лучшего объекта (предпочтительного) или упорядочение от лучшего объекта к худшему.

Этап 5. Анализ решения и оценка его устойчивости.

Поскольку результаты, полученные на предшествующем этапе, являются лишь реко-

мендацией для ЛПР, то, естественно, окончательное решение остаётся за человеком. Поэтому для того, чтобы убедиться в надёжности результатов, ЛПР может проверить устойчивость полученного решения внесением изменений в модель или исходные данные. Для этих целей ЛПР может вернуться к этапу 1 или 2, исключить некоторые объекты или добавить новые, изменить набор критериев, уточнить цифровую информацию или свои предпочтения на этапе определения весовых коэффициентов.

Кроме того, ЛПР всегда может решить задачу другими методами и убедиться в надёжности решения, сопоставив результаты нескольких прогонов модели.

Определение коэффициентов относительной важности критериев. Под определением оценок относительной важности критериев обычно понимают процесс, состоящий из двух этапов:

измерения, или получения исходных данных от ЛПР;

обработки данных формальными математическими методами.

В результате процесса каждому критерию ставится в соответствие неотрицательное число w_i, $i = 1,2,...,m$, такое что

$$0 < w_i < 1,\ \sum_{i=1}^{m} w_i = 1,\ i = 1, 2, ..., m,$$

где m — количество оцениваемых критериев.

При этом числа w_i ($i = 1, 2, ..., m$), называемые коэффициентами относительной важности, не только задают упорядочение критериев по важности, но и характеризуют, во сколько раз один критерий важнее другого.

Числовые оценки такого типа называют оценками по шкале отношений. Для равноценных критериев, т.е. критериев, для которых невозможно установить приоритет по важности, значения весовых коэффициентов w_i выбираются одинаковыми

$$w_i = \frac{1}{m},\ i = 1, 2, ..., m.$$

Для неравноценных критериев, т. е. критериев, для которых ЛПР может установить приоритет по важности, значения весовых коэффициентов обычно определяются с использованием специальных методов шкалирования [2].

Наиболее надёжным и широко используемым методом решения задачи определения коэффициентов относительной важности критериев является метод собственных значений Т. Саати [5].

При использовании этого метода на первом этапе ЛПР осуществляет парные сравнения оцениваемых критериев. Практика показывает, что парные сравнения — это наиболее удобная для человека форма выражения своих предпочтений. Затруднения, которые испытывает ЛПР при осуществлении парных сравнений критериев, сводятся до минимума, а избыточная информация, содержащаяся в целиком заполненной матрице парных сравнений, позволяет в процессе обработки существенно уменьшить влияние ошибок, допущенных экспертами при выполнении элементарных операций попарного сопоставления ценностей отдельных критериев.

ЛПР, пользуясь вербально-числовой шкалой, заполняет матрицу парных сравнений. Подробное описание данного процесса и правил использования вербально-числовой шкалы приводится в работе [2].

Основная цель применения вербально-числовой шкалы состоит в том, чтобы облегчить задачу ЛПР и обеспечить единое толкование оценок различными экспертами.

Элементы матриц парных сравнений a_{jk} рассматриваются в качестве оценок отношений w_j и w_k, т.е. $a_{jk} = \frac{w_j}{w_k}$, где $w = (w_1, w_2, ..., w_m)$ — вектор действительных искомых коэффициентов относительной важности критериев.

В идеальном случае оценки a_{jk} должны быть связаны определёнными соотношениями. Например, если критерий j важнее критерия k в два раза, а критерий k важнее критерия i в три раза, то можно было бы считать, что j-й критерий важнее i-го в шесть раз, если $a_{ji} = 2$, $a_{ik} = 3$, но $a_{jk} = 1$, а не 6, то ЛПР, назначивший эти оценки, был явно непоследовательным.

Если оценки назначены справедливо, то они должны удовлетворять условию

$$\forall_{i,\,j,\,k}\ a_{ji}a_{ik} = a_{jk}.$$

Матрица, в которой указанное условие выполняется для всех элементов, называется сверхтранзитивной.

Оценка коэффициентов относительной важности критериев по сверхтранзитивной матрице не представляет особого труда и сводится к расчёту по формуле

$$w_i = \frac{1}{a_{ik}},\ i = 1, 2, ..., m;$$

k — номер любой строки с последующей их нормировкой.

Если свойство согласованности элементов матрицы не соблюдается и имеет место непоследовательность в ответах ЛПР, то задача оценки коэффициентов относительной важности сводится к определению $\lambda_{\max}$ — максимального собственного значения упоминавшейся выше матрицы парных сравнений A и соответствующего ему собственного вектора ω.

Одним из простейших методов решения данной задачи является так называемый степенной алгоритм. Работу алгоритма можно представить в виде следующей многошаговой процедуры:

1. Положить $k = 0$ и рассчитать начальные оценки весовых коэффициентов:

$$\omega = \frac{1}{m},\ i = 1, 2, ..., m;\ \lambda^k = 10^{-10}.$$

2. Принять $k = k + 1$ и рассчитать $\omega^k = A\omega^{k-1}$.

3. Рассчитать оценку максимального собственного значения

$$\lambda_k = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{\omega_i^k}{\omega_i^{k-1}}.$$

4. Определить ω и провести нормировку по формуле $\omega^k = \dfrac{\omega^k}{\omega_{\max}^k}$:

$$\omega_{\max}^k = \arg\max \omega_i^k,\ i = 1, 2, ..., m.$$

Если $|\lambda^k - \lambda^{k-1}| < \xi$, где ξ —заранее заданная точность определения максимального собственного значения, то перейти к шагу 5. В противном случае — к шагу 2.

5. Отнормировать полученные значения коэффициентов относительной важности по формуле

$$\omega_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^{m}\omega_i}.$$

Для оценки степени согласованности суждений каждого из экспертов (ЛПР) в методике Т. Саати рассматривается величина индекса согласованности

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}.$$

Групповая оценка получается с использованием коэффициентов компетентности экспертов.

Простейший способ получения групповой оценки реализуется при условии, что все эксперты равны. При этом вычисляются средние оценки:

$$w_i = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} w_{ik},\ i = 1, 2, ..., m.$$

Однако на практике эксперты отличаются компетентностью, аргументированностью, объективностью и информированностью [6]. Для учёта этих факторов введём весовые коэффициенты компетентности экспертов q_k ($k = 1, 2, ..., N$).

Тогда оценки вычисляются как

$$w_i = \sum_{i=1}^{m} q_k w_{ik},\ i = 1, 2, ..., m.$$

Численные значения коэффициентов компетентности q_k можно получить по информации о том, насколько оценки k-го эксперта согласованы с оценками других экспертов. Для этого можно воспользоваться следующей итерационной процедурой.

Начальное значение вектора компетентности q^0 выбирается из условия, что все эксперты равноправны:

$$q^0 = \begin{pmatrix} \frac{1}{N} \\ \frac{1}{\ldots N} \\ \frac{1}{N} \end{pmatrix}.$$

Последующие итерации выполняются по формулам

$$\begin{cases} w^r = Wq^{r-1}; \\ (q^r)^T = \dfrac{1}{Z^r}(w^r)^T W, (r = 1, 2, \ldots); \\ Z^r = \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{N} w_i^r w_{ik}. \end{cases}$$

После нескольких итераций при выполнении условия $\max\limits_{1 \leqslant i \leqslant m}\left|w_i^r - w_i^{r-1}\right| \leqslant \xi$ получается групповое решение о значениях коэффициентов w_i^r, $i = 1, 2, ..., m$ с учётом компетентности экспертов и согласованности их мнений.

Алгоритмы многокритериального выбора объектов авиационной техники. Наибольшее распространение на практике при обликовых исследованиях объектов авиационной техники получили алгоритмы, реализующие методы

Парето, простого аддитивного взвешивания, TOPSIS, ЭЛЕКТРА, анализа иерархических структур, собственных значений Саати, наименьших квадратов и неполных строчных сумм. Остановимся на некоторых из них.

В соответствии с методом Парето объект a_i предпочитается объекту a_j, если вектор оценок объекта a_i не хуже, чем тот же вектор для a_j, т. е. $a_i > a_j$, если $[g_1(a_i), g_2(a_i), ..., g_m(a_i)] \geqslant [g_1(a_j), g_2(a_j), ..., g_m(a_j)]$.

Записанное соотношение является векторным отношением «не хуже». Его выполнение означает, что оценки объекта a_i по всем критериям не хуже соответствующих оценок объекта a_j и, по крайней мере, хотя бы по одному критерию объект a_i строго предпочтительнее объекта a_j. Формально это условие можно записать в виде неравенств

$$g_s(a_i) \geqslant g_s(a_j),\ g_k(a_i) > g_k(a_j),\quad s \neq k,\ s = 1, 2, ..., m. \qquad (1)$$

Понятие «оптимального» объекта не обязательно означает единственное решение. В общем случае это подмножество объектов. В тех случаях, когда эффективное решение является единственным, оно представляет собой окончательное (оптимальное) решение.

Множество эффективных решений определяется перебором и сравнением всех пар объектов на основе соотношения (1).

Решения, для которых выполняются эти соотношения, образуют множество эффективных решений, которые иногда называют множеством Парето, или множеством недоминируемых решений [2, 4].

Для множества эффективных решений справедливы два свойства, существо которых сводится к следующему:

два любых эффективных объекта являются недоминирующими по отношению друг к другу;

для любого объекта, не принадлежащего множеству эффективных решений, всегда найдётся, по крайней мере, один эффективный объект, который доминирует над ним.

Следствием этих свойств является то обстоятельство, что оптимальный объект всегда находится среди эффективных.

Таким образом, в задаче выбора, определив множество эффективных объектов, достаточно в дальнейшем рассматривать только это множество для нахождения оптимального решения, отбросив все объекты, не являющиеся эффективными.

В задаче упорядочения так поступить нельзя, так как здесь необходимо определить «место в строю» от лучшего до худшего для всех объектов, в том числе и для неэффективных.

В соответствии с методом аддитивного взвешивания выбор наилучшего объекта и упорядочение объектов заданного множества осуществляются по следующим правилам:

а) выбор

$$a^{\bullet} = \arg\max\left\{\Phi_i = \sum_{j=1}^{m} g_{ji} w_j\right\}; \qquad (2)$$

б) упорядочение

$$a_i P a_j, \text{ если } \Phi_i > \Phi_j, \qquad (3)$$

$$a_i I a_j, \text{ если } \Phi_i = \Phi_j, \qquad (4)$$

где $a^{\bullet}$ — наилучший объект; P — бинарное отношение предпочтения, т.е. имеет место $a_i P a_j$, если объект a_i предпочтительнее объекта a_j; I — бинарное отношение неразличимости, т.е. если объект a_i неразличим по предпочтительности с объектом a_j; Φ_i — обобщённая оценка i-го объекта; w_j — коэффициент относительной важности j-го критерия; g_{ji} — количественная оценка i-го объекта с точки зрения j-го критерия.

Метод простого аддитивного взвешивания относится к классу компенсационных методов, в которых допускается, что низкие оценки объекта по одной части критериев могут быть компенсированы высокими оценками по другой их части.

В соотношениях (2)—(4) без потери общности предполагается, что оценки по всем критериям необходимо максимизировать.

В общем случае в многокритериальных методах компенсационного типа для того, чтобы соотношения (2)—(4) носили универсальный характер, осуществляется нормирование исходной матрицы оценок по следующим формулам:

$$g^{\bullet}_{ji} = \begin{cases} \dfrac{g_{ji} - g_{j\min}}{g_{j\max} - g_{j\min}}, \text{если оценки} \\ \text{по данному критерию} \\ \text{необходимо максимизировать;} \\ \dfrac{g_{j\max} - g_{ji}}{g_{j\max} - g_{j\min}}, \text{если оценки} \\ \text{по данному критерию} \\ \text{необходимо минимизировать,} \end{cases}$$

$$g_{j\min} = \min_i\{g_{ji}\},\ g_{j\max} = \max_i\{g_{ji}\},$$

$$j = 1, 2, ..., m.$$

Указанное нормирование позволяет заменить оценки по отдельным критериям $G = \{g_1, g_2, ..., g_m\}$, имеющих различную размерность, безразмерными числами g_{ji} из диапазона [0, 1]. После такой замены линейная свёртка (2) представляется более осмысленной, а величины Φ_i выполняют роль обобщённых оценок объектов с учётом всей совокупности критериев.

Основная идея метода TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to ideal Solution) сводится к тому, что ЛПР задаёт в пространстве критериев точку, соответствующую «идеальному» решению, и оцениваемые объекты упорядочиваются по близости к этому «идеалу».

Предполагается, что по каждому из критериев имеет место монотонно возрастающая функция полезности. С учётом этого допущения можно легко отыскать «идеальное решение», составив его из наилучших оценок по каждому критерию. Таким же образом вводится «отрицательный идеал» (выбираются наихудшие оценки по каждому критерию).

В качестве решения логично выбрать объект на минимальном расстоянии от идеальной точки. При этом хотелось бы, чтобы этот объект оказался в то же время наиболее удалённым от «отрицательного идеала». На самом деле это не всегда так, и альтернатива, ближайшая к идеалу, может оказаться на меньшем расстоянии от «отрицательного идеала», чем некоторые другие альтернативы. При этом достаточно сложно обосновать выбор альтернативы в качестве наиболее предпочтительной. Поэтому в методе TOPSIS одновременно учитываются расстояния как до «положительного», так и до «отрицательного» идеалов. С этой целью рассчитывается мера относительной близости к идеальному решению $S^{(+)}$.

Входной информацией для работы алгоритма, реализующего метод TOPSIS, является матрица оценок объектов и вектор весовых коэффициентов критериев.

В упрощённом виде алгоритм может быть представлен в виде последовательно реализуемых шести шагов:

1. Нормирование матрицы оценок $\|P_{ij}\|$. За счёт нормирования оценки по различным критериям переводятся в разряд относительных (безразмерных) величин вида $r_{ij} = \dfrac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{x_{ij}} x_{ij}^2}}$.

2. Формирование взвешенной матрицы $\|V\|$ решений, при которых каждый столбец матрицы $\|r_{ij}\|$ умножается на соответствующий весовой коэффициент w_i.

3. Нахождение «идеального» варианта и «отрицательного идеала». В имеющееся множество объектов условно вводится ещё два объекта: $A^{(+)}$ (идеал) и $A^{(-)}$ (отрицательный идеал), которые имеют вид

$$A^{(+)} = \left\{ \begin{matrix} (\max v_{ij} | j \in j^{\max}), \\ \left(\min_i v_{ij} | j \in j^{\min}\right) | i = 1,\ 2,\ \ldots, M \end{matrix} \right\} = \left\{ v_1^{(+)}, \ldots, v_j^{(+)}, \ldots, v_N^{(+)} \right\},$$

$$A^{(-)} = \left\{ \begin{matrix} (\min v_{ij} | j \in j^{\max}), \\ \left(\max_i v_{ij} | j \in j^{\min}\right) | i = 1,\ 2,\ \ldots, M \end{matrix} \right\} = \left\{ v_1^{(-)}, \ldots, v_j^{(-)}, \ldots, v_N^{(-)} \right\},$$

где $j^{\max}$ — множество критериев, по которым необходимо обеспечить максимум; $j^{\min}$ — множество критериев, по которым необходимо обеспечить минимум.

4. Расчёт меры разделения объектов, в качестве которой можно использовать евклидово расстояние в пространстве критериев. Расстояние от каждого из объектов до «идеального» варианта рассчитывается по формуле

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} (v_{ij} - v_j^{(+)})^2},\ i = 1,\ 2,\ \ldots, M.$$

Аналогично рассчитывается расстояние до «отрицательного идеала»:

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} (v_{ij} - v_j^{(-)})^2},\ i = 1,\ 2,\ \ldots, M.$$

5. Относительная близость i-го объекта к идеалу определяется по формуле

$$S_i^{(+)} = \frac{d_i^{(-)}}{d_i^{(+)} + d_i^{(-)}},$$

$$0 < S_i^{(+)} < 1,\ i = 1, 2, ..., M.$$

Очевидно, что $S_i^{(+)} = 1$, если $A_i = A^{(+)}$ и $S_i^{(+)} = 0$, если $A_i = A^{(-)}$.

6. Упорядочение объектов по предпочтительности осуществляется в соответствии с правилами

$$\forall a_i, a_j \in A \begin{cases} a_i P a_j \Leftrightarrow S_i^{(+)} > S_j^{(+)} \\ a_i I a_j \Leftrightarrow S_i^{(+)} = S_j^{(+)} \end{cases}.$$

Практические рекомендации по использованию различных методов решения многокритериальных задач. При обликовых исследованиях нередко возникает вопрос о том, каким конкретно методом воспользоваться при решении многокритериальных задач. Выбор наилучшего метода для решения конкретной задачи сам по себе представляет достаточно сложную многокритериальную задачу. Поэтому в современных системах поддержки решений пытаются алгоритмизировать и эту процедуру.

В процессе выбора метода необходимо учитывать следующие аспекты:

степень знакомства пользователя с методами многокритериального выбора;

размерность задачи (количество оцениваемых объектов и количество учитываемых критериев выбора);

тип задачи (выбор или упорядочение);

особенности исходной информации.

Если исследователь впервые сталкивается с решением многокритериальной задачи, то желательно воспользоваться рассмотренными выше наиболее простыми методами: аддитивного взвешивания или TOPSIS, которые требуют от ЛПР минимального объёма исходной информации.

Методы Парето и ЭЛЕКТРА желательно использовать для решения задач выбора, особенно при большом количестве исходного множества объектов. При использовании метода Парето выделяется подмножество недоминирующих альтернатив. По методу ЭЛЕКТРА подмножество лучших объектов определяется с учётом коэффициентов относительной важности критериев. Кроме того, исследователь изменением пороговых значений коэффициентов согласия и несогласия может расширить и сузить подмножество наилучших объектов. Подбором порогов можно в ряде случаев добиться сужения этого подмножества до одного объекта, т. е. окончательно решить задачу выбора. Однако в общем случае, методы Парето и ЭЛЕКТРА носят вспомогательный характер, позволяют только сравнивать множество оцениваемых объектов для последующего анализа с использованием других методов.

Наиболее критичными к размерности задачи оказываются такие трудоёмкие методы, как метод анализа иерархических структур и метод потоков. Их желательно использовать для тщательного анализа наиболее ответственных задач при числе объектов и критериев не более девяти.

В задачах большой размерности (при числе объектов и критериев более девяти) лучше применять методы простого аддитивного взвешивания и TOPSIS. Их чаще всего рекомендуют в качестве экспресс-анализа многокритериальных задач.

Особое место, с точки зрения формы исходной информации, занимает метод анализа иерархических структур. Классическая версия метода обычно применяется для решения задач, использующих критерии, по которым сложно получить количественные оценки объектов. Например, «перспективность», «уровень автоматизации бортовых систем», «безопасность экипажа» и т. д. В таких задачах ЛПР легче произвести попарное сравнение объектов по каждому из критериев. Что касается выборов методов определения весовых коэффициентов критериев, то в качестве наиболее надёжного и хорошо зарекомендовавшего себя в практических приложениях можно рекомендовать метод собственных значений Саати.

Метод наименьших квадратов и неполных строчных сумм выгодно использовать при большом числе критериев (более девяти), а также в тех случаях, когда ЛПР затрудняется сравнить некоторые пары критериев и оставляет часть входной матрицы незаполненной.

Следует отметить, что методы, обеспечивающие наиболее качественное сравнение альтернатив (например, метод анализа иерархий), могут быть применены для сравнения ограниченного количества вариантов. На практике исходное множество альтернативных вариантов развития авиатехники военного назначения существенно превышает возможности этих методов.

В ситуациях, когда применение упомянутых выше методов не обеспечивает сокращение исходного множества до требуемых размеров, может использоваться пошаговое сужение недоминируемых вариантов путём применения итеративных методов. В этих методах неформальные этапы, на которых вводятся допущения и получается информация о предпочтениях ЛПР и неопределённых факторах (если последние имеют место), чередуются с формальными этапами обработки данной ин-

формации по правилам, формулируемым на основе принятых допущений, проверки справедливости допущений, а также выяснения необходимости следующего шага. Другими словами, собирается дополнительная информация и вводятся дополнительные допущения лишь в том случае, когда имеющихся в наличии данных для решения задачи явно недостаточно. Итеративные методы реализуются в форме диалога «человек—компьютер», и называются интерактивными процедурами.

Общие требования к порядку построения моделей предпочтения в рамках итеративных методов были сформулированы в работах [1, 2].

В заключение отметим, что для того, чтобы убедиться в правильности полученных результатов, их надёжности и устойчивости, многими авторами рекомендуется провести проверку чувствительности результатов к изменению входной информации, а также осуществить решение задачи несколькими методами.

Библиографические ссылки

1. **Буренок В.М., Ляпунов В.М., Мудров В.И.** Теория и практика планирования и управления развитием вооружения; [под ред. А.М. Московского]. М.: Изд-ский дом «Граница», 2005. 520 с.

2. **Ларичев О.И.** Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2002. 391 с.

3. **Макеев С.П., Шахнов И.Ф.** Упорядочение объектов в иерархических системах // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1991. № 3. С. 29—46.

4. **Хованов Н.В.** Математические основы теории шкал измерения качества. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 184 с.

5. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.

6. **Шибанов Г.П.** Порядок формирования экспертных групп и проведения коллективной экспертизы // Информационные технологии. 2003. № 12. С. 19—22.

УДК 004.932

И.В. Цапко, канд. техн. наук, доц., **А.В. Власов**
(Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

Irina@aics.ru

ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ МЕТОДОМ ПОИСКА ГРАНИЦ РЕГИОНОВ

Предложен алгоритм определения местоположения объекта и его границ на рентгенографическом изображении. Рассматриваемый алгоритм основан на предварительном анализе гистограммы яркости изображения, извлечении из неё дополнительных информативных параметров и дальнейшем их использовании совместно с детектором границ регионов, что позволяет тем самым сократить время обработки. В дальнейшем предполагается доработка предложенного алгоритма с целью его применения в системах реального времени для слежения за изменением положения или ориентации частей объектов на изображении.

Ключевые слова: рентгенографические изображения; обработка изображений; распознавание образов; алгоритм детектирования границ.

An algorithm for determining the object location and its boundaries in the X-ray image is proposed. Concerned algorithm is based on a preliminary analysis of the image luminance histogram, extracting from histogram additional informative parameters and their further utilization jointly with the region borders detector. This thereby allows to reduce processing time. In future the offered algorithm improvement is supposed with the purpose of its application in real-time systems for traking of the position changes or objects parts orientation changes in the image.

Key words: X-ray image; image processing; appearance recognition; algorithm boundaries detection action algorithm.

Введение. Разработка алгоритмов определения положения объекта на растровом изображении (детектирование объекта) в настоящее время является одной из актуальных задач [14]. Результатом действия подобных алгоритмов является обнаружение объекта на изображении, его положения в системе координат пикселей исходного изображения в

виде координат прямоугольника, окаймляющего объект, контура объекта либо координат наиболее характерных точек.

В данной работе рассматривается обработка рентгенографических изображений, полученных высокоскоростной камерой Photron SA-1, используемой на станции топотомографии синхротрона ANKA технологического института г. Карлсруэ (Германия). Одним из направлений исследования в институте синхротронного излучения является неразрушающее тестирование и геометрическое измерение в биологии и палеонтологии.

Цель работы — разработка алгоритмов для обнаружения и выделения всего объекта или некоторых его частей на изображении, определение его позиции относительно центра снимка. Работа является продолжением исследований, изложенных в [5].

Обзор методов детектирования. Существующие методы детектирования объектов формально можно представить в виде методов:

основанных на использовании характерных признаков объекта, заданных в виде набора векторов в определённых точках. В частности, в работе [1] представлены экспериментальная оценка и сравнение дескрипторов регионов при геометрических и фотометрических трансформациях снимка. Среди прочих рассматриваются дескрипторы, основанные на гистограммах, градиентных моментах и Гауссовых производных;

поиска объектов на основе некоторого шаблона, например, в виде матрицы интенсивности, наиболее характерных для объекта цветов, или набора дескрипторов, содержащих информацию о геометрическом представлении объекта [2];

выделения движущихся объектов на основе нескольких изображений одной и той же сцены, которые, как правило, требуют участия оператора для указания области слежения.

Однако методы детектирования объектов предполагают проведение предварительного обучения алгоритма или сразу настроены на поиск определённых объектов, обладающих характерными особенностями.

Применительно к поставленной задаче целесообразно использовать методы сегментации изображения, так как контуры объекта позволяют целиком определить его форму, местоположение, а также выделить и распознать отдельные части.

Ввиду того, что рентгенографическое изображение представляется в полутоновом цветовом диапазоне, под контуром будем понимать пространственно протяжённый разрыв, перепад или скачкообразное изменение яркости, при этом границы объекта должны быть представлены одним или несколькими контурами без самопересечений.

Распространёнными дефектами данных изображений являются слабый контраст, обусловленный нелинейной функцией изменения интенсивности пикселей от максимума до минимума, что не позволяет хорошо идентифицировать отдельные части объекта, а также присутствие шумовой составляющей, вызванной наложением сигналов от различных структур тканей, через которые проходят рентгеновские лучи. Особенности исследуемых изображений не позволяют качественно решить задачу сегментации при помощи какого-либо одного известного метода. В таких случаях, как правило, предлагаются решения, сочетающие различные подходы.

В ряде работ для сегментации рентгенографических изображений используются методы, основанные на кластеризации. В работе [6] описан алгоритм выделения цветовых кластеров в пространстве и определения их границ. Однако подобные методы не дают приемлемый результат для зашумлённых изображений, так как образуют множество небольших регионов, что требует участия оператора для их объединения.

Одним из наиболее эффективных методов сегментации является метод водораздела. В частности, в работе [7] рассмотрены алгоритмы, сочетающие в себе данный метод с использованием информации о величине градиента яркости, что даёт хорошие результаты, но в ряде сложных случаев требует вмешательства извне.

Среди всего многообразия методов сегментации наибольший интерес представляют методы, ориентированные на поиск границ регионов, которые хорошо разработаны для полутоновых изображений [2—4]. Как правило, подобные методы требуют предварительной подготовки исходного изображения в виде коррекции яркости и контрастности, выравнивании гистограммы яркости, освещённости изображения, а затем определяются границы объекта анализом перепада яркости.

Для решения поставленных задач обработки исходных изображений в качестве базового был выбран метод выделения границ, позволяющий чётко выделять внешние и внутренние контуры, обладающий слабой чув-

ствительностью к шумам и ориентации границ областей [3].

В общем случае алгоритм выделения границ включает в себя следующие этапы: сглаживание; поиск градиентов; двойную пороговую фильтрацию; трассировку области неоднозначности.

Для устранения шумов и сглаживания перепадов интенсивности применяется фильтр Гаусса.

На этапе поиска градиентов используются специализированные фильтры с конечной импульсной характеристикой, являющиеся разновидностью оператора Собеля. Данные фильтры представляют собой маски, с помощью которых вычисляется приближённое значение производной по вертикали, горизонтали или диагоналям [4].

Для определения в каждой точке изображения нахождения или отсутствия границ применяется пороговая фильтрация. Детектор использует два пороговых значения (верхняя и нижняя границы). Пиксели, значение яркости которых ниже установленной границы, подавляются, а пиксели, имеющие яркость больше верхнего значения, считаются относящимися к границе изображения. Остальная группа пикселей, относящаяся к промежуточному значению, анализируется на предмет соединения с одной из обнаруженных границ и либо подавляется, либо считается принятой [4].

На последнем этапе обработки все пиксели, прошедшие предыдущие этапы, проверяются на близкое расположение друг к другу. Пиксели, лежащие обособленно или на некотором отдалении от границы, подавляются. Пиксели, расположенные в непосредственной близости по одному из вертикальных, горизонтальных или диагональных направлений, определяются как результирующая граница.

Алгоритм выделения границ объекта. Ввиду общности поставленной задачи применение базового алгоритма определения границ предполагает не слишком высокую скорость обработки изображений, а применительно к ряду подзадач (например, определение местоположения объекта, выделение его контуров) можно предположить, что выполнение не всех этапов или частичное их упрощение позволит соблюсти некий баланс между скоростью обработки и качеством результата.

На рис. 1 представлена структурная схема алгоритма выделения границ исследуемого объекта.

Исходное изображение загружается и для снижения влияния шумовой составляющей сглаживается гауссовским фильтром. Функция Гаусса в двухмерном случае имеет вид:

$$Gauss(x, y, \sigma) = \frac{e^{\frac{-(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2},$$

где $(x^2 + y^2)$ — радиус размытия; σ — стандартное отклонение распределения Гаусса.

Сглаживание осуществляется стандартными методами свёртки продвижением маски над обрабатываемым изображением и проведением манипуляций над квадратом пикселей (эксперимент показал наилучшие результаты при использовании маски размером 5 × 5 и отклонения распределения $\sigma = 3$).

Как правило, рентгенографические изображения имеют очень слабый контраст, что приводит к искажению и недостаточной идентификации объектов или их частей. Поэтому на этапе предварительной подготовки улучшают контрастную разрешающую способность изображения выравниванием гистограммы яркостей.

Гистограмма $H(I)$ представляет собой зависимость распределения элементов цифрового изображения $I[M, N]$ с различными значениями яркости $I \in \{0, 1, ..., R\}$, где $R = \max(I[M, N])$.

Выравнивание гистограммы подразумевает преобразование яркостей исходного изображения для придания желаемой формы гистограмме яркостей обработанного изображения. Существует большое количество математических методов и алгоритмов, позволяющих выполнить данную процедуру, однако выбор

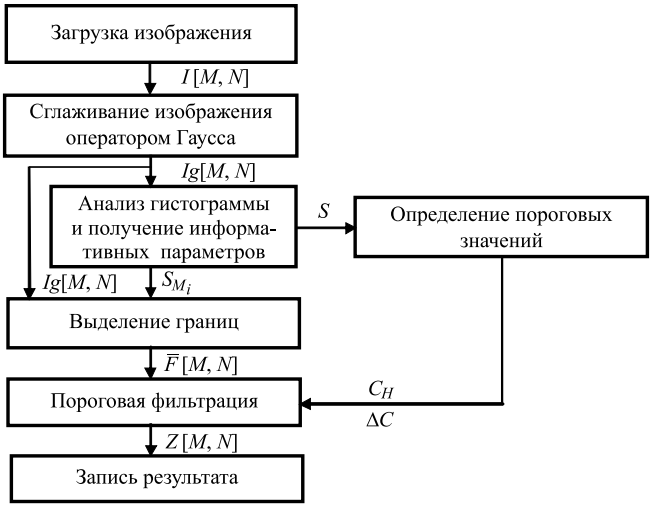


Рис. 1. Структурная схема алгоритма выделения границ

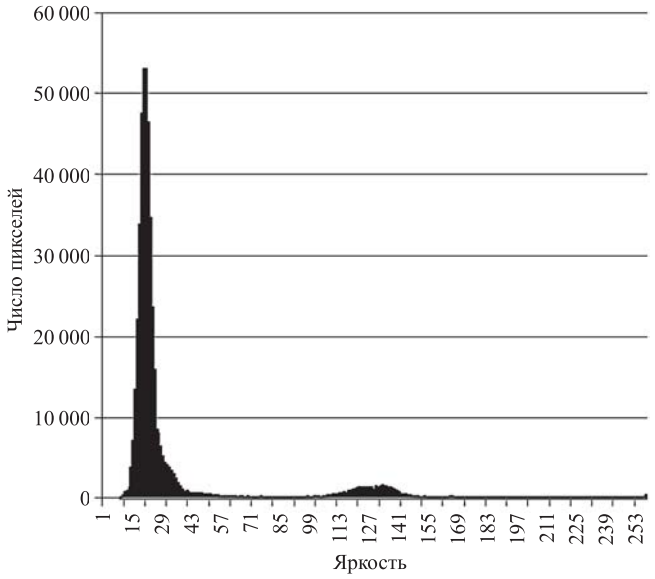


Рис. 2. Гистограмма исследуемого объекта

конкретного способа определяется качеством исходного изображения и конечной целью преобразования. На рис. 2 представлена гистограмма одного из анализируемых изображений, которая показывает наличие двух ярко выраженных областей различной интенсивности (фон и исследуемый объект), а также предоставляет и потенциальную информацию о площади интересующего объекта.

Таким образом, предлагается на этапе предварительной обработки не проведение процедуры выравнивания гистограммы яркостей, а только её анализ для использования результатов на последующих этапах. Подобный подход применяется при анализе цифровых изображений, в частности в работе [8] описывается способ автоматической сегментации полутонового изображения, использующий информацию о форме гистограммы яркости, получаемую аппроксимацией исходной яркостной гистограммы и вычислением весов областей разделения для каждого из найденных яркостных интервалов. В дальнейшем проводится вычисление коэффициентов для обеспечения операции порогового среза исходного изображения управляющей бинарной маской.

Исходное изображение задаётся матрицей $I[M, N]$, в которой каждый элемент представляет собой пиксель, значение яркости которого изменяется от 0 до 255. Определим яркостное расстояние между двумя пикселями p и p':

$$d(p, p') = \max\{|I(p) - I(p')|\}.$$

Два соседних пикселя будут считаться идентичными, если яркостное расстояние между ними меньше некоторого порогового значения:

$$d(p, p') \leqslant C_H.$$

Для вычисления порогового значения C_H выполняется построение и анализ гистограммы яркости. В работе [4] описано, что функция плотности вероятности на выделенном сечении определяется нормализацией гистограммы градаций серого на общее количество составляющих её пикселей:

$$P(I) = \sum_{i=1}^{L} w_i P_i(I),$$

где I — значение яркости; $P(I)$ — функция плотности вероятности от всего сечения изображения; $P_i(I)$ — функция плотности вероятности для i-го подмножества; L — общее число подмножеств, на которое разбивается изображение, определяемое количеством выраженных фоновых мод; w_i — весовой коэффициент для i-го подмножества.

Информативная часть гистограммы разбивается на L подмножеств. Вводится понятие расстояния между соседними подмножествами:

$$R_i = |H[i] - H[i + 1]|.$$

В результате определяется итоговое расстояние как $S = \max\limits_{1 \leqslant i \leqslant L}(R_i)$.

Гистограмма яркости позволяет определить соотношение площадей исследуемого объекта и фона. Для этого вычисляются значения локальных максимумов $g_i = \max\limits_{a \leqslant i \leqslant b}(H[i])$, которые принимаются за вершины фоновых мод M_i. Справа от каждой найденной вершины находится минимальный элемент $q_i = \min\limits_{g_i < i < g_{i+1}}(H[i])$ и вычисляется ширина моды $\Delta V = 2 \cdot |g_i - q_i|$. Далее определяется площадь каждого объекта $S_{M_i} = \sum\limits_{\Delta V_i} H[i]$, что позволяет вычислить пороговое значение C_H и ширину порога ΔC.

В общем случае анализ гистограммы яркости изображения сводится к выполнению следующих этапов:

выделение информативной части гистограммы;

оценка гистограммы;

вычисление пороговых значений коэффициентов, используемых на этапе пороговой фильтрации;

определение количества точек просматриваемого шаблона изображения.

На сглаженном изображении определяются границы объекта с использованием дифференциального оператора Собеля, который представляет собой маску размером 3 × 3 и позволяет вычислить первую производную (градиент), учитывая горизонтальное, вертикальное и диагональные направления. В результате получается матрица градиентного перепада изображения $\bar{F}$, каждый элемент которой является вектором градиента интенсивности изображения в соответствующей точке.

На последнем этапе алгоритма для определения нахождения или отсутствия границы в данной точке используется пороговая фильтрация. Детектор границ, описанный в работе [3], использует два порога фильтрации. Однако применительно к поставленной задаче для поиска положения объекта, или только внешних границ, можно использовать одно пороговое значение, что значительно сократит вычисления, при этом результат будет оставаться приемлемым.

Исследования предлагаемого алгоритма. При определении границ анализируемого объекта большое влияние на время работы алгоритма оказывает размер обрабатываемого изображения. Соответственно, уменьшение количества точек шаблона приведёт к возрастанию производительности детектирования. В работе [9] предлагался метод использования каждой *n*-й точки шаблона при вычислении степени близости контуров, основанный на предварительном обучении алгоритма на поиск определённых контуров на изображении.

Для определения шага детектирования границ объекта используется информация о его площади. В результате проведённых экспериментов на тестовом наборе изображений установлено, что для достоверного определения границ объекта оптимальным коэффициентом является значение шага 1 % от размера стороны изображения, а для определения позиции объекта возможно использование шага в 3 %. Этой информации, как правило, бывает достаточно для выделения ряда признаков объекта, что в дальнейшем позволит упростить процедуры распознавания и идентификации. В качестве такого параметра в предлагаемом алгоритме вычисляется размер описанного вокруг объекта прямоугольника, что даёт потенциальную информацию о положении объекта на снимке, координатах геометрического центра изображения объекта, расстояниях от центра до границ изображения объекта.

Описанный выше алгоритм выделения границ применён к обработке рентгенографических изображений размерами 512 × 512 и 1024 × 1024 пикселей, имеющих различные степени яркости и контрастности, на которых представлены объекты разных форм и размеров. На рис. 3 представлен пример детектирования внешних границ объекта и его положения предлагаемым упрощённым алгоритмом выделения границ.

На рис. 4 показаны зависимости времени обработки изображений размером 512 × 512 пик-

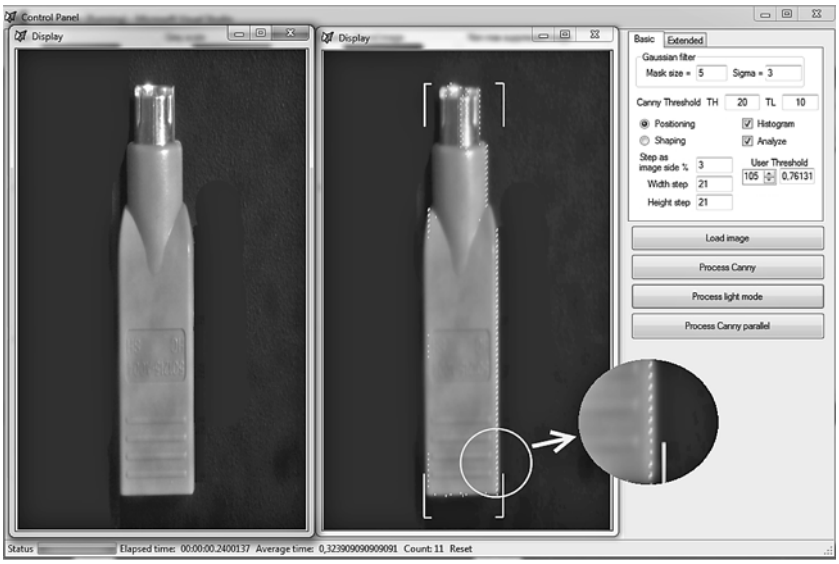


Рис. 3. Пример детектирования границ объекта и его местоположения

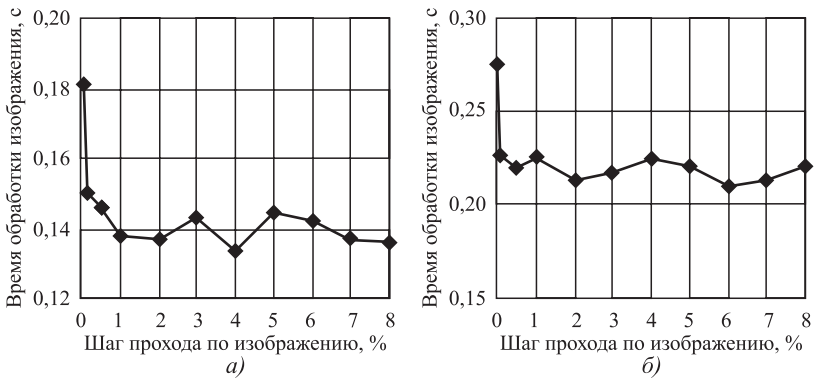


Рис. 4. Зависимости времени работы предлагаемого алгоритма от шага прохода по изображению размером 512 × 512 пикселей (*а*) и 1024 × 1024 пикселей (*б*)

селей (рис. 4, *а*) и 1024 × 1024 пикселей (рис. 4, *б*) от шага прохода по изображению.

В качестве результата работы алгоритма рассматривался контур объекта (при проходе с шагом в 1 % от стороны изображения) или положение объекта на изображении (при проходе с шагом 3 %). Время работы предлагаемого алгоритма сравнивалось со временем работы детектора границ [3]. Результаты тестирования приведены в таблице.

Результаты тестирования алгоритма выделения границ

Размер изображения, пиксели	Детектор границ, с	Предлагаемый алгоритм	
		Определение контура объекта, с	Определение положения объекта, с
1024 × 1024	0,368	0,252	0,185
1024 × 1024	0,415	0,308	0,235
1024 × 1024	0,846	0,769	0,530
512 × 512	0,218	0,161	0,115

Заключение. Таким образом, представлен алгоритм выделения границ объекта, основанный на упрощении ряда этапов алгоритма поиска границ регионов, предложенного в работе [3], применительно к обработке рентгенографических изображений. Рассмотрены варианты анализа предварительной информации об исходном изображении в виде его гистограммы яркости для определения информативных параметров и дальнейшего их использования на последующих этапах обработки. В зависимости от требований оператора результатом работы алгоритма может быть как контур исследуемого объекта, так и его положение на снимке.

Разработанный алгоритм протестирован на различных изображениях. В результате время обработки сокращено более чем в 1,5 раза. Предлагаемый алгоритм может быть использован в приложениях обработки рентгенографических изображений. Так же допустимо продолжить исследования для адаптации данного алгоритма применительно к системам реального времени слежения за объектами.

Библиографические ссылки

1. **Mikolajczyk K., Schmid C.** A performance evaluation of local descriptors // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2005. Vol. 27. No. 10. P. 1615—1630.

2. **Forsyth D.A., Ponce J.** Computer Vision: A Modern Approach (2nd Edition). Prentice Hall, 2011. 465 p.

3. **Canny J.** A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1986. Vol. 8. No. 6. P. 679—698.

4. **Gonzalez R.C.** Digital image processing. Prentice Hall, 2008. 954 p.

5. **Власов А.В., Цапко И.В.** Модификация алгоритма Канни применительно к обработке рентгенографических изображений // Вестник науки Сибири. 2013. № 4 (10). С. 120—127.

6. **Comaniciu D., Meer P.** Cell image segmentation for diagnostic pathology, advanced algorithmic approaches to medical image segmentation: state-of-the-art applications in cardiology, neurology, mammography and pathology. Berlin: Springer, 2001. P. 541—558.

7. **Wahlby C., Bengtsson E.** Segmentation of Cell Nuclei in Tissue by Combining Seeded Watersheds with Gradient Information // LNCS, «Image Analysis», 13 Scandinavian Conference, Halmstad, Sweeden. 2003. Vol. 2749. P. 408—414.

8. **Мадонов А.Е., Белоконь С.П.** Способ автоматической сегментации полутонового изображения по форме яркостной гистограммы // Патент России № 2148858 (C1). Бюл. № 33.

9. **Shotton J., Blake A., Cipolla R.** Multi-scale categorical object recognition using contour fragments // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2008. Vol. 30. № 7. P. 1270—1281.

УДК 536.532

Г.Я. Хусаинова, канд. физ.-мат. наук, доц.
(Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)
gkama@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ РАСТВОРИТЕЛЯМИ

Рассмотрена задача о закачке растворителя в пористую среду, засорённую отложением твёрдой фазы (парафином, битумом). Плоскоодномерной и радиально-симметричной фильтрацией получены автомодельные решения, описывающие распределение давления и скорости, а также эволюцию очищенной зоны. Приведены численные оценки для величины, определяющей законы движения границы очищенной зоны в зависимости от параметров пласта и закачиваемого растворителя.

Ключевые слова: закачка; растворитель; фильтрация; автомодельное решение; очищенная зона; парафин; нефтяная скважина, пористая среда.

The task about pumping solvent into the porous medium clogged with a solid phase sediment (paraffin, bitumen) is considered. The automodel decisions describing pressure and speed distributions and also the cleared zone evolution are received by means of a flat one-dimensional and radial-symmetric filtrations. Numerical valuation for the value defining movement laws of the cleared zone border depending on layer parameters and pumped solvent are adduced.

Key words: pumping; solvent; filtration; automodel decision; cleared zone; paraffin; oil well; the porous medium.

Введение. Одной из наиболее распространённых причин ухудшения коллекторных характеристик пласта в призабойной зоне нефтяных скважин является «склеротические» изменения за счёт отложения твёрдой фазы (парафина) на стенки поровых каналов. В большинстве случаев удаление этих отложений можно осуществить закачкой растворителя. Необходимые оценки для проведения технологических расчётов с применением растворителя можно получить на основе решений плоскоодномерной и радиально-симметричной задач. В частности, если радиально-симметричная задача позволяет проанализировать очищение пористой среды вокруг скважины, то плоскоодномерная — проследить эти процессы вблизи трещин, образованных, например, при гидроразрыве. Также отметим, что принятые в данной работе теоретические постановки задач могут быть использованы для расчётов при кислотной обработке призабойной зоны пластов для карбонатосодержащих пород. Некоторые аспекты вытеснения углеводородной жидкости из пористых сред с помощью растворителей рассмотрены в работах [1—3].

Основные уравнения. Пусть среда с пористостью m в исходном состоянии частично закупорена твёрдой фазой, которая растворяется в закачиваемой жидкости. Объёмная доля, занятая твёрдой фазой, равна ν и поэтому «живая» пористость составляет $m' = (1 - \nu)m$. Кроме того, засорённая пористая среда, в свою очередь, насыщена жидкостью. При закачке растворителя в такую систему можно выделить три характерные зоны: ближнюю, очищенную от твёрдой фазы пористую среду (с пористостью m), где в порах находится чистый растворитель; вторую промежуточную зону (с пористостью m'), в которой фильтруется насыщенный твердой фазой растворитель; и третью, дальнюю зону, где происходит фильтрационное течение исходной насыщающей жидкости. Отметим, что согласно принятым представлениям в этих трёх зонах находятся три разные жидкости, отличающиеся вязкостью, сжимаемостью (определяемой величиной скорости звука), а также равновесными значениями плотности. Параметры, соответствующие этим трём зонам, будут снабжены индексами 1, 2 и 3 внизу. Будем полагать, что фильтрационные процессы при закачке растворителя происходят при упругом режиме. Тогда линейное уравнение пьезопроводности и закон Дарси можно записать в виде

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} = \chi_i \frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^n \frac{\partial p_i}{\partial r}\right),\ u_i = m_i \upsilon_i = -\frac{k_i}{\mu_i}\frac{\partial p_i}{\partial r}, \quad (1)$$

$$\chi_i = \frac{k_i \rho_i C_i^2}{\mu_i m_i},\ m_1 = m,\ m_2 = m_3 = m' = m(1 - \nu),$$

$$k_2 = k_3,$$

где p_i, υ_i, u_i — давление, истинная скорость и скорость фильтрации; ρ_i — равновесная плотность жидкости; m_i, k_i, μ_i, C_i — коэффициенты пористости, проницаемости, динамической вязкости и скорости звука в жидкости, определяющие сжимаемость; χ_i — коэффициент пьезопроводности; $n = 0$ и $n = 1$ соответствуют плоскоодномерной и радиально-симметричной задачам.

Отметим, что принятые выше допущения для структуры зон фактически пренебрегают протяжённостью областей, в которых растворяется и смывается твёрдая фаза. Тем самым эти области заменяются поверхностями разрывов для части переменных (например, скорости фильтрации) и параметров, определяющих фильтрационные характеристики (пористость, проницаемость, вязкость). Кроме того, в дальнейшем будем пренебрегать гидравлическим сопротивлением в этих областях и на границах между зонами запишем условие непрерывности давления:

$$p_1 = p_2 = p_{12}\ (r = r_{12}),$$
$$p_2 = p_3 = p_{23}\ (r = r_{23}).$$

Из закона сохранения масс для всей системы растворитель — твёрдая фаза на границе между первой и второй зонами следует равенство

$$\rho_1 m_1\left(\upsilon_1 - \frac{dr_{12}}{dt}\right) = \\ = \rho_2 m_2\left(\upsilon_2 - \frac{dr_{12}}{dt}\right) - \rho_s m\nu\frac{dr_{12}}{dt},\ (r = r_{12}), \quad (2)$$

где ρ_s — плотность твёрдой фазы.

Уравнение сохранения массы растворителя на этой границе запишется в виде

$$\rho_1 m_1\left(\upsilon_1 - \frac{dr_{12}}{dt}\right) = \\ = (1-g)\rho_2 m_2\left(\upsilon_2 - \frac{dr_{12}}{dt}\right), (r = r_{12}), \quad (3)$$

где g — массовая концентрация твёрдой фазы в растворителе в состоянии насыщения.

Уравнения (2) и (3) записаны в линеаризованном приближении, принимая для плотностей жидкостей их равновесные значения. Также отметим, что изменение плотностей за счёт повышения давления по сравнению с равновесным значением внесёт ошибку порядка $\Delta\tilde{\rho}_i \ll 1$ ($\Delta\tilde{\rho}_i = \frac{\Delta\rho_i}{\rho_i}$, $\Delta\rho_i$ — максимальное изменение плотности из-за сжатия).

Соотношение (2) и (3) с учётом закона Дарси из (1) могут быть представлены в виде

$$\frac{k_1}{\mu_1}\frac{\partial p_1}{\partial r} = -m\frac{(1-g)\rho_s\nu + g\rho_1}{g\rho_1}\frac{dr_{12}}{dt};$$
$$\frac{k_2}{\mu_2}\frac{\partial p_2}{\partial r} = -m\frac{g\rho_2(1-\nu) + \rho_s\nu}{g\rho_2}\frac{dr_{12}}{dt}, (r = r_{12}). \quad (4)$$

На границе между второй и третьей зонами полагаем условие несмешивающегося вытеснения. Тогда для этого условия, принимающего, что данная граница является и поверхностью контактного разрыва, можно записать

$$\rho_2 m_2\left(\upsilon_2 - \frac{dr_{23}}{dt}\right) = \rho_3 m_3\left(\upsilon_3 - \frac{dr_{12}}{dt}\right) = 0, (r = r_{23}).$$

Отсюда, с учётом закона Дарси из (1) имеем

$$\frac{k_2}{\mu_2}\frac{\partial p_2}{\partial r} = \frac{k_3}{\mu_3}\frac{\partial p_3}{\partial r} = -m(1-\nu)\frac{dr_{23}}{dt}, (r = r_{23}). \quad (5)$$

В случае отсутствия твёрдых отложений в исходном состоянии ($\nu = 0$) следует, что промежуточная область будет отсутствовать ($r_{12} = r_{23}$), и тогда получим известные результаты [4].

Если для зависимости коэффициентов абсолютной проницаемости от «живой» пористости, принять формулы Козейи—Кармана, то можем записать

$$k_1 = k_0\frac{m^3}{(1-m)^2}, k_2 = k_3 = k_0\frac{m^3(1-\nu)^3}{(1-m(1-\nu))^2}, \quad (6)$$

где k_0 — параметр, отвечающий за характерные размеры пор.

Плоскоодномерная задача ($n = 0$, $r = x$). Пусть растворитель закачивается при внезапном повышении давления до некоторого постоянного значения p_e на границе пористой среды. При этом начальное давление в пористой среде равно $p_0 (p_e > p_0)$. Отмеченные начальное и граничное условия могут быть записаны в виде

$$p_3 = p_0,\ (x > 0,\ t = 0),\ p_1 = p_e,\ (x = 0,\ t > 0). \quad (7)$$

Эта задача имеет автомодельное решение, которое имеет вид

$$p_1 = p_e + (p_{12} - p_e)\frac{\int_0^{\xi}\exp(-\frac{\xi'^2}{4})d\xi'}{\int_0^{\xi_{12}}\exp(-\frac{\xi'^2}{4})d\xi'},$$

$(0 < \xi < \xi_{12})$;

$$p_2 = p_{12} + (p_{23} - p_{12})\frac{\int\limits_{\xi_{12}}^{\xi} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2})d\xi'}{\int\limits_{\xi_{12}}^{\xi_{23}} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2})d\xi'},$$

$(\xi_{12} < \xi < \xi_{23})$;

$$p_3 = p_{23} + (p_0 - p_{23})\frac{\int\limits_{\xi_{23}}^{\xi} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3})d\xi'}{\int\limits_{\xi_{23}}^{\infty} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3})d\xi'},$$

$(\xi_{12} < \xi < \infty)$;

$(\xi = x/\sqrt{\chi_1 t},\ \eta_i = \chi_i/\chi_1\ (i = 2,3))$.

Используя эти решения, на основе граничных условий (4) и (5) можно получить следующую систему транцендентных уравнений для определения в автомодельных переменных координат границ ξ_{12} и ξ_{23} между зонами:

$$g\exp\left[\left(\xi_{23}^2 - \xi_{13}^2\right)/4\eta_2\right] = \frac{g\rho_2(1-\nu) + \rho_s\nu}{\rho_2(1-\nu)}\frac{\xi_{12}}{\xi_{23}};$$

$$\frac{(1-g)\rho_s\nu + g\rho_1}{g\rho_1}\frac{\mu_1}{k_1}\xi_{12}\exp(\frac{\xi_{12}^2}{4})\int\limits_0^{\xi_{12}}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4}\right)d\xi' -$$
$$-(1-\nu)\xi_{23}\frac{\mu_2}{k_2}\exp\left(\frac{\xi_{23}^2}{4\eta_2}\right)\int\limits_{\xi_{12}}^{\xi_{23}}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2}\right)d\xi' -$$
$$-(1-\nu)\xi_{23}\frac{\mu_3}{k_3}\exp\left(\frac{\xi_{23}^2}{4\eta_3}\right)\times$$
$$\times\int\limits_{\xi_{23}}^{\infty}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3}\right)d\xi = -2\frac{\Delta p}{m\chi_1}. \quad (8)$$

При этом значение давления на границах между зонами можно определить из выражений

$$p_{12} = p_e - \frac{1}{2}\left[(1-g)\rho_s\nu + g\rho_1\right]\times$$
$$\times C_1^2\xi_{12}\exp\left(+\frac{\xi_{12}^2}{4}\right)\int\limits_0^{\xi_{12}}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4}\right)d\xi';$$

$$p_{23} = p_0 + \frac{1}{2}\frac{\mu_3}{\mu_1}\frac{k_1}{k_3}(1-\nu)\times$$
$$\times\rho_1 C_1^2\xi_{23}\exp\left(+\frac{\xi_{(23)}^2}{4\eta_3}\right)\int\limits_{\xi_{12}}^{\infty}\exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3}\right)d\xi'.$$

Рассмотрим случай, когда

$$\frac{\rho_s}{\rho_1} \approx \frac{\rho_2}{\rho_1} \approx \frac{\rho_3}{\rho_1} \approx \frac{g(1-\nu)}{g(1-\nu)+\nu} \approx$$
$$\approx\frac{\mu_2}{\mu_1} \approx \frac{\mu_3}{\mu_1} \approx \frac{k_2}{k_1} \approx \frac{k_3}{k_1} \approx \eta_2 \approx \eta_3 \approx 1.$$

Решение уравнений (8), удовлетворяющие условиям, будет

$$\xi_{12},\ \xi_{23} \ll 1. \quad (9)$$

Из уравнений (8) следует, что

$$\xi_{12} = \frac{g\rho_2(1-\nu)}{g\rho_2(1-\nu)+\rho_s\nu}\xi_{23}, \quad (10)$$

$$\xi_{23} = 2\sqrt{\frac{\pi}{(1-\nu)}\frac{\mu_1}{\mu_3}\frac{\rho_1}{\rho_3}}\frac{C_3}{C_1}\frac{\Delta p}{\rho_1 C_1^2}. \quad (11)$$

Отсюда видно, что полученные решения (10) и (11) для ξ_{12} и ξ_{23} удовлетворяют условиям (9) при достаточно слабом перепаде давления, удовлетворяющем условию

$$\Delta p \ll \sqrt{1-\nu}\ \rho_1 C_1^2.$$

В этом случае в первой и второй зонах имеем квазистационарные профили распределения давлений, определяемые формулами:

$$p_1 = p_e + (p_{12} - p_e)\frac{\xi}{\xi_{12}},\ \ 0 < \xi < \xi_{12};$$

$$p_2 = p_{12} + (p_{23} - p_{12})\frac{\xi - \xi_{12}}{\xi_{23} - \xi_{12}},\ \ \xi_{12} < \xi < \xi_{23}.$$

При этом значения давлений на границах между зонами имеют вид

$$p_{12} = p_e - \frac{\rho_1 C_1^2}{2}\frac{(1-g)\rho_s\nu + g\rho_1}{g\rho_1}\xi_{12}^2;,$$

$$p_{23} = p_0 - \frac{\rho_1 C_1^2}{2}\times$$
$$\times\left[\frac{(1-g)\rho_s\nu + g\rho_1}{g\rho_1} + \frac{\mu_2}{\mu_1}\frac{k_1}{k_2}\frac{\rho_s\nu}{g\rho_2}\right]\xi_{12}^2. \quad (12)$$

Отметим, что полученные простые формулы (10)—(12) для основных характеристик первой (очищенной) зоны в большинстве случаев (с точки зрения практических приложений) справедливы в достаточно большом диапазоне параметров исходной пористой среды, растворителя, а также величины перепада давления Δp. Рассмотрим случай, когда растворителем является керосин, а растворимая твёрдая фаза — битум. Для такой системы при температурах T_0 = 300 и 343 K, используя данные, приведённые в работе [4], имеем следующие значения параметров: μ_1 = 0,002 и

0,0006 Па·с, μ_2 = 0,003 и 0,0009 Па·с, μ_3 = 0,02 и 0,002 Па·с, $\rho_1 \approx \rho_2 \approx \rho_3 \approx 900$ кг/м^3, $C_1 \approx C_2 \approx \approx C_3 \approx 1500$ м/с, g = 0,6 и 0,9. Для характеристик пористой среды примем следующие значения: m = 0,3, $k_1 = 10^{-12}$ м^2, ν = 0,9. Тогда в соответствии с формулами (1) и (6) имеем $m_2 = m_3 = 0{,}03$, $k_2 \approx k_3 \approx 10^{-13}$ м^2. Для коэффициентов пьезопроводности, используя принятые выше значения параметров жидкости и пористой среды в разных зонах, получим $\chi_1 \approx 3{,}5$ и 13 м^2/с, $\chi_2 \approx 2{,}5$ и 9 м^2/с, χ_3 = 0,4 и 4 м^2/с. Отсюда, используя формулы (10) и (11) при перепаде давления $\Delta p \approx 5\cdot 10^6$ Па, для безразмерной координаты, определяющий закон продвижения границы очищенной зоны, имеем ξ_{12} = 0,0005 и 0,001 (ξ_{23} = 0,008 и 0,013).

В заключение отметим, что в случае несжимаемых жидкостей ($C_i \to \infty$) полученные решения вырождаются, и, в частности, имеем ξ_{12}, $\xi_{23} \to 0$. Физически это означает, что невозможно сдвигать вязкую несжимаемую жидкость, находящуюся в области полубесконечной пористой среды конечным перепадом давления Δp.

Радиально-симметричная задача (n = 1). Для закачки растворителя с постоянным объёмным расходом, отнесённым на единицу длины скважины, с некоторого момента времени задача имеет также автомодельное решение. При этом соответствующие начальное и граничное условия запишутся в виде

$$p_3 = p_0,\ (t = 0,\ r > 0);$$

$$2\pi \frac{k_1}{\mu_1} r_c \left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)_{r_c} = q,\ \ (t > 0,\ r_c \to 0).$$

Решение, аналогичное с (7), имеет вид

$$p_1 = p_{12} + \tilde{q} \int_{\xi}^{\xi_{12}} \xi'^{-1} \exp\left(-\frac{\xi'^2}{4}\right) d\xi',\ \ (0 < \xi < \xi_{12});$$

$$p_2 = p_{12} + (p_{23} - p_{12}) \frac{\int_{\xi_{12}}^{\xi} \xi'^{-1} \exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2}\right) d\xi'}{\int_{\xi_{12}}^{\xi_{23}} \xi'^{-1} \exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2}\right) d\xi'}, \quad (13)$$

$(\xi_{12} < \xi < \xi_{23})$;

$$p_3 = p_{23} + \frac{(p_{23} - p_0) \int_{\xi_{23}}^{\xi} \xi'^{-1} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3}) d\xi'}{\int_{\xi_{23}}^{\infty} \xi'^{-1} \exp(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3}) d\xi'},$$

$(\xi_{23} < \xi < \infty)$,

$$\left(\hat{q} = \frac{q}{2\pi} \frac{\mu_1}{k_1}\right).$$

На основе граничных условий (4), используя решения (13), можем получить уравнение для определения ξ_{12} и ξ_{23}:

$$g \exp\left(\frac{\xi_{23}^2 - \xi_{12}^2}{4\eta_2}\right) = \frac{g\rho_2(1-\nu) + \rho_s \nu}{\rho_2(1-\nu)} \left(\frac{\xi_{12}}{\xi_{23}}\right)^2, \quad (14)$$

$$\xi_{12}^2 \exp\left(\frac{\xi_{12}^2}{4}\right) = 2 \frac{\hat{q} g}{((1-g)\rho_s \nu + g\rho_1) C_1^2}. \quad (15)$$

Для определения давления между зонами на основе последнего уравнения из (14) следует

$$p_{23} = p_0 + (1-\nu) \frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{k_1}{k_2} \frac{\xi_{23}^2}{2} \times \times \exp\left(\frac{\xi_{23}^2}{4\eta_3}\right) \int_{\xi_{23}}^{\infty} \xi'^{-1} \exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_3}\right) d\xi'; \quad (16)$$

$$p_{12} = p_0 + p_{23} + (1-\nu) \frac{\mu_3}{\mu_1} \frac{k_1}{k_3} \frac{\xi_{23}^2}{2} \times \times \exp\left(\frac{\xi_{23}^2}{4\eta_2}\right) \int_{\xi_{12}}^{\xi_{23}} \xi'^{-1} \exp\left(-\frac{\xi'^2}{4\eta_2}\right) d\xi'.$$

Для корней уравнений (14) и (15), удовлетворяющим условиям ξ_{12}, $\xi_{23} \ll 1$, получим

$$\xi_{12} = \sqrt{2 \frac{g\hat{q}}{((1-g)\rho_s \nu + g\rho_2) C_1^2}}; \quad \xi_{23} = \xi_{12} \sqrt{\frac{g\rho_2(1-\nu) + \rho_s \nu}{g\rho_2(1-\nu)}}. \quad (17)$$

Используя ассимптотику для интегрально показательной функции

$$-Ei(-x) = \ln\frac{1}{x} - 0{,}5772,\ \ -Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du,$$

соответствующую малым значениям аргумента ($x \ll 1$), для значений давлений между зонами из (16) получим

$$p_{23} = p_0 + (1-\nu) \frac{\mu_3}{\mu_1} \frac{k_1}{k_3} \rho_1 C_1^2 \frac{\xi_{23}^2}{4} \left(\ln\frac{4\eta_3}{\xi_{23}^2} - 0{,}5772\right);$$

$$p_{12} = p_{23} + (1-\nu) \frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{k_1}{k_2} \rho_1 C_1^2 \frac{\xi_{23}^2}{2} \left(\ln\frac{\xi_{23}}{\xi_{12}^2}\right).$$

При этом для распределения давления имеем

$$p_1 = p_{12} + 2\tilde{q}\ln\left(\frac{\xi_{12}}{\xi}\right),\ (0 < \xi < \xi_{12});$$

$$p_2 = p_{12} + (p_{23} - p_{12})\frac{\ln\left(\frac{\xi_{12}}{\xi}\right)}{\ln\left(\frac{\xi_{12}}{\xi_{23}}\right)},\ (\xi_{12} < \xi < \xi_{23});$$

$$p_3 = p_{23} + (p_0 - p_{23})\frac{\ln\left(\frac{\xi_{23}}{\xi}\right)}{\ln\left(\frac{4\eta_3}{\xi_{23}}\right) - 0,5772},$$

$$(\xi_{23} < \xi,\ \ \xi \ll 1).$$

Эти решения справедливы при достаточно слабых расходах закачки, удовлетворяющих условию $q \ll q_*$, где $q_* = \frac{\pi k_1}{\mu_1}\frac{((1-g)\rho_s\nu + g\rho_2)C_1^2}{g}$.

Для приведённых выше значений параметров системы при $T_0 = 300$ и 340 K для критического расхода, в частности, $q_* \approx 6$ и 8 м^2/с при значении расхода растворителя $q = 10^{-1}$ м^2/с на основе формул (17) получим $\xi_{12} \approx 0{,}13$ и 0,08; $\xi_{23} \approx 0{,}5$ и 0,3.

Предложенные в работе математические модели и полученные на их основе аналитические формулы позволяют определить законы движения границы очищенной зоны в зависимости от параметров пласта и закачиваемого растворителя. Полученные результаты представляют большой интерес для использования в различных технологических процессах, в частности, при эксплуатации газонефтяных скважин.

Библиографические ссылки

1. **Забродин П., Раковский Н.Л., Розенберг М.Д.** Вытеснение нефти из пласта растворителем. М.: Недра, 1968. 224 с.

2. **Хусаинов И.Г.** Тепловые процессы при акустическом воздействии на насыщенную жидкостью пористую среду // Вестник Башкирского университета. 2013. Т. 18. № 2. С. 350—353.

3. **Шагапов В.Ш., Хусаинова Г.Я., Хусаинов И.Г., Хафизов Р.М.** Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой горной породой // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 3. С. 106—112.

4. **Хусаинов И.Г., Юмагузина А.Г.** Распределение температуры в однородной пористой среде при акустическом воздействии на призабойную зону // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2003. № 62. С. 118—127.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей,
присылаемых для публикации,
можно найти на сайте www.mashin.ru

УДК 65.9

А.П. Иванов, д-р экон. наук, проф.
(Московский государственный университет путей сообщения),
О.С. Пыченкова (Оренбургский государственный университет)
korotych.olga@mail.ru

РАЗРАБОТКА ШКАЛЫ СОЦИАЛЬНОГО РЕЙТИНГА БАНКОВ

Рассмотрены требования к содержанию основных факторов, определяющих социальную ответственность банка, и построению шкалы социального рейтинга российских банков. Раскрыты принципы и факторы, влияющие на выделение градаций в российской шкале социальной ответственности.

Ключевые слова: социальная ответственность; корпоративная социальная ответственность; социальная отчётность; деловая репутация; рейтинг банка; рейтинговая шкала

The basic requirements to the main factors content determining the bank social responsibility and the scale construction of the Russian banks social ranking are considered. The maxims and factors influencing the gradations emphasis of grades in the Russian scale of social responsibility are disclosed.

Key words: social responsibility; corporate social responsibility; social accountability; business reputation; the bank's rating; rating scale.

В последнее время наряду с прибылью и связанными с ней финансово-экономическими показателями банки стремятся к достижению социальных, этических и экологических целей. Рост конкуренции в отечественном банковском секторе обусловливает возрастающую роль неценовых факторов в борьбе на рынке банковских услуг. В настоящее время практически все банки предлагают примерно одинаковый набор услуг по сопоставимым ценам и качеству, поэтому конкуренция банков переходит на качественно новый уровень.

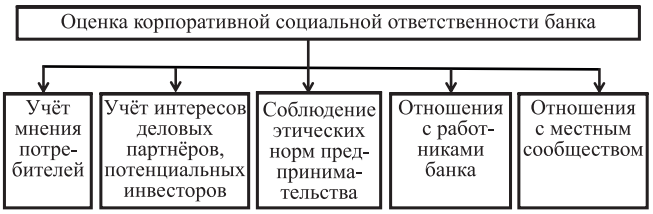
Эволюция концепции корпоративной социальной ответственности (КСО) привела к тому, что многие её идеи стали активно использоваться в работе банков. Внимание, которое в последнее время кредитные учреждения уделяют развитию корпоративной культуры, свидетельствует о переходе банков на путь долгосрочного эффективного развития на основе социально-ответственного поведения. *Социальная ответственность* банка подразумевает не только его активное участие в финансировании социальной сферы в дополнение к усилиям государства, но и развитие связей с местным сообществом.

В современных условиях одним из эффективных механизмов повышения конкурентоспособности банка является его социально ответственное поведение. Банки вкладывают средства в реализацию социальных проектов, решение ключевых социальных проблем населения и работников, становясь полноправным и ответственным субъектом социальной политики. Поскольку КСО является частью общей системы управления банком, то оценивать её нужно по тому вкладу, который она вносит в реализацию целей банка: выживаемость, рост, ответственность, прибыль, снижение текучести кадров и т. д.

На сегодняшний день не существует единой общепринятой концепции КСО. Методологические подходы к пониманию сущности КСО отличаются значительным многообразием. В связи с этим в современной экономической и управленческой науке сущность КСО не раскрыта в соответствии с требованиями перспективного, технологического и организационно-экономического развития.

Как и любой другой вид деятельности, КСО формируется в рамках процедурного подхода, проходя этапы планирования, анализа, корректировки и контроля. Концепция основана на методологических принципах, образующих определённый научный базис.

Цель данной статьи определена возросшим интересом к деятельности банка, связанного с усилившимся вниманием бизнеса к позиционированию и оценке своей социальной ответственности [1].



Направления оценки КСО банка

Концепция КСО включает в себя систему направлений деятельности банка. Кроме политики ответственности на микроуровне (обучение и переподготовка сотрудников, их социальное обеспечение, медицинское страхование, справедливая заработная плата и др.), существует политика долгосрочного устойчивого развития (см. рисунок).

На мнение потребителей влияют события и условия, которые идентифицируют банк с учётом ряда внешних факторов (состояние рекламы, информационной открытости, коммуникаций с клиентами и т. д.).

Учёт интересов деловых партнёров определяется уровнем корпоративной культуры и действиями банка в отношении заинтересованных сторон, в соответствии с международными стандартами и отечественным законодательством.

Соблюдение этических норм предпринимательства, включая действующие нормы и правила, предполагает анализ не только собственных действий, но и учёт интересов деловых партнёров.

Отношения между банком и работниками включают в себя условия труда, своевременность и степень оплаты труда, выполнение социальных и материальных гарантий, повышение квалификации работников и их профессиональных навыков.

Оценка отношений с властными структурами и местным сообществом предполагает полноту и своевременность уплаты налогов, отказ банка от особых отношений с чиновниками, участие банка в работе на благо местных сообществ (транспорт, автостоянки, состояние подъездных путей и т. д.).

В настоящее время не существует единого определения социальной ответственности. Все известные подходы едины в одном: социальную ответственность необходимо рассматривать с точки зрения международных организаций, государства, бизнеса и общества в целом [2]. В категорию КСО обычно включается:

ответственность компаний во взаимоотношениях с партнерами;

корпоративное развитие — проведение реструктуризации и организационных изменений с участием менеджмента банка, персонала и общественных организаций;

здоровье и безопасность сотрудников на рабочих местах;

политика ответственности в отношениях с работниками, управление развитием персонала;

экономическая ответственность, политика в использовании местных условий и инфраструктуры;

взаимодействие с местными органами власти, государственными структурами и общественными организациями для решения общих социальных проблем;

PR-информационное обеспечение перечисленных выше направлений.

Для понимания сущности описываемой категории банк необходимо рассматривать в следующих аспектах:

создаёт привлекательные рабочие места;

обеспечивает выполнение качественных услуг (обоснованная линейка вкладов в соответствии с действующим законодательством);

полностью выплачивает налоги с соблюдением законов, сроков и последовательности выполнения;

банк-партнёр демонстрирует добросовестную деловую практику, устанавливает надёжные связи и отношения с взаимозависимыми лицами.

Высокая и стабильная социальная ответственность банка способствует повышению финансовых показателей и снижению операционных расходов.

Интеграция принципов КСО в стратегию развития финансовых отношений становится характерной чертой современных банков. Банки, обладая основными финансовыми ресурсами, оказывают большое влияние на решение социальных проблем общества и развитие территории, на которой они находятся.

КСО как политика и концепция стратегического развития банков распространяется на взаимосвязанные направления:

укрепление имиджа и деловой репутации;

развитие персонала;

взаимодействие с органами местного самоуправления, государственными структурами и общественными организациями для решения общих социальных проблем и др.

Социальную деятельность банков необходимо планировать, анализировать, корректировать и контролировать, она также должна иметь методические принципы и научный базис. Методика формирования КСО должна иметь определённую последовательность внедрения и

оценки корпоративных социальных программ; превращаться в фактор устойчивого развития.

Повышение роли и значимости КСО банка в современных условиях делает её одним из важнейших структурных элементов, формирующих деловую репутацию и обеспечивающих банку устойчивое конкурентное преимущество на рынке финансовых услуг. КСО как важнейшая репутационная характеристика предполагает учёт и минимизацию негативных воздействий банка на экономику, общество и окружающую среду. Выделение КСО банка в качестве одного из основных управляющих параметров позволяет выстроить целостную эффективную систему управления деловой репутацией банка.

Таким образом, успех банковского бизнеса в значительной степени зависит от репутации и ответственности банка, сложившихся на рынке. В соответствии с «Рекомендациями по организации управления правовым риском потери деловой репутации в кредитных организациях и банковских группах», разработанными Центральным банком РФ, используется следующее определение: «деловая репутация кредитной организации — качественная оценка участниками гражданского оборота деятельности кредитной организации, а также действий её реальных владельцев, аффилированных лиц, дочерних и зависимых организаций» [3].

Если ещё недавно деловая репутация и социальная ответственность банка интересовали узкий круг специалистов, то сейчас эти понятия имеют большое значение и для рядовых граждан, интересующихся безопасностью своих вкладов с позиций организации, с которой они сотрудничают. Угроза потери репутации и ответственности особенно опасна для банков, поскольку суть их деятельности — поддержание высокого доверия контрагентов.

Социальная ответственность, как и деловая репутация банка, формируется из следующих составляющих:

репутации первых лиц;

социальной позиции (что банк даёт обществу, кроме налогов — например, его благотворительные программы);

качества сервиса;

поведения персонала;

рекламной и брендовой политики;

отношений с государством и авторитетными клиентами;

географии банка (наличие региональных филиалов, близости и доступности офиса);

возможности тем или иным способом поддерживать своё международное признание (через сделки, рейтинги, премии).

Учитывая высокую чувствительность банков к колебаниям общественного мнения, а также масштабность рекламного и PR-сопровождения, особое значение приобретает повышение качества управления социальной ответственностью банка, что обеспечивает снижение уровня репутационных рисков.

Заботясь о формировании положительного имиджа, банки разрабатывают кодексы корпоративного поведения (кодекс этики, положение о корпоративной культуре), где прописаны принципы отношений между клиентами и собственными сотрудниками. Например, крупный российский коммерческий банк ОАО «Альфа-Банк» указывает, что «дорожа безупречной деловой репутацией, банк будет и впредь выполнять все обязательства перед своими клиентами, и репутация и система отношений с клиентами позволят поддерживать высокий уровень лояльности клиентов» [4]. При этом основные слагаемые успеха следующие:

общество удостоверилось в надёжности банка как финансового института;

банк предлагает клиентам продукты высокой доходности и конкурентоспособности, располагая сильными бизнес-подразделениями;

банк сумел выстоять и сохранить доброе имя во время финансовых кризисов;

банк становится ближе к клиенту, неуклонно расширяя филиальную сеть;

банк продолжал рекламу и PR-акции и тогда, когда активность в выбранном сегменте рынка была сведена к минимуму;

PR-коммуникации банка всегда отличала точность содержания информации и её выверенная подача;

банк сумел добиться лидерства среди частных банков, что делает более привлекательной и заметной его PR-активность.

Оценка деловой активности банка клиентами и партнёрами имеет непосредственное отношение к деловым связям банка. При этом деловая репутация и ответственность являются наиболее уязвимыми из числа его активов. Характерными источниками угроз успешной деятельности банка являются операционные сбои, нарушение законов и инструкций, регулирующих банковскую деятельность. При этом важно разработать такую шкалу оценки деятельности банка, включая социальную ответственность, которая объективно характеризует положения коммерческой организации.

Шкала корпоративной социальной ответственности банка может быть построена с учётом критериев и показателей российской шкалы кредитного рейтинга, созданной для

оценки банков со стороны клиентов, деловых партнёров, финансовых посредников и инвесторов, и других участников финансовой системы. На основе шкалы кредитного рейтинга присваиваются рейтинговые оценки участникам финансовых отношений, включая способность и намерение деловых партнёров своевременно и полностью выполнять свои социальные обязательства.

Российская шкала кредитного рейтинга использует традиционные символы Standard & Poor's с префиксом «ru» для обозначения «Россия» и указания на использование шкалы исключительно в условиях российского финансового рынка [5].

Анализ показывает, что критерии и показатели оценки рейтинга корпоративной социальной ответственности и национальной шкалы кредитного рейтинга в значительной степени совпадают. Это даёт основание использовать шкалу кредитного рейтинга в рейтинговых оценках корпоративной социальной ответственности банка. Как указано в материалах Standard & Poor's, рейтинг делового партнёра является разновидностью кредитного рейтинга [5].

В таблице даны оценки корпоративной социальной ответственности банка и соответствующие шкале кредитного рейтинга специфические условия и показатели оценки корпоративной социальной ответственности банка.

Рейтинговая оценка банка основана на текущей информации, получаемой из различных источников, которые Standard & Poor's сочтёт надёжными. Эта оценка может быть скорректирована, временно приостановлена или отозвана в результате каких-либо изменений в информации либо отсутствия достоверной информации.

Рейтинги социальных обязательств по российской шкале основаны на следующих положениях:

относительной вероятности выполнения социальных обязательств — рейтинг может принимать способность и желание банка выполнить свои обязательства в срок и в полном объёме;

Градации оценки корпоративной социальной ответственности (КСО) банка

Наименование позиций	Содержание (состояние) социальной ответственности (деятельности) банка
ru AAA	Самый высокий рейтинг характеризует способность банка своевременно и полностью выполнять социальные обязательства, его высокую платёжеспособность, надёжность и конкурентоспособность.
ru AA	Положение и финансовое состояние банка незначительно отличаются от позиций ru AAA, банк характеризуется высокой способностью выполнять социальные обязательства, хорошим состоянием активов, высокой капитализацией доходов.
ru A	Показатели социальной деятельности банка, состояние его активов и обязательств подвержены воздействию неблагоприятных факторов. Банк характеризуется умеренно высокой способностью своевременно и полностью выполнять социальные обязательства относительно аналогичных ситуаций, однако обязательства более чувствительны к неблагоприятным последствиям изменения обстоятельств и экономической ситуации, чем в предыдущих случаях.
ru BBB	Рейтинг отражает достаточную способность банка своевременно и полностью выполнять социальные обязательства, поддерживать свою платёжеспособность, высокие результаты производственной и финансовой деятельности. Банк чувствителен к воздействию неблагоприятных факторов или среды функционирования, что приводит к ослаблению способности банка исполнять свои обязательства.
ru BB	Банк имеет определённую способность выполнять социальные обязательства, однако неопределённость ситуации или влияние неблагоприятных изменений в экономических и финансовых условиях могут привести к недостаточной способности банка выполнять свои социальные обязательства, временному снижению платёжеспособности.
ru B	В текущий момент банк способен в срок и в удовлетворительном объёме выполнить свои социальные обязательства перед заинтересованными лицами, однако неблагоприятное развитие событий (действие факторов среды) может помешать выполнению этих обязательств.
ru CCC	В текущий момент существует потенциальная возможность снижения показателей финансовой и социальной деятельности банка. Своевременное выполнение социальных обязательств в значительной мере зависит от благоприятных коммерческих, финансовых и производственных условий деятельности банка.
ru CC	Рейтинг отражает высокую вероятность невыполнения банком своих обязательств, включая социальные, перед партнёрами. Положение банка финансово неустойчиво, введено управление на конкурсной основе.
ru C	Рейтинг свидетельствует о возбуждении процедуры банкротства банка, результаты его деятельности по основным социальным обязательствам значительно ослаблены.
ru D	Присвоение этого рейтинга свидетельствует о прекращении социальной деятельности банка. Эта оценка используется после подачи банком заявления о банкротстве.

природе и характеристике социальных обязательств;

позиции данных социальных обязательств в случае банкротства, реорганизации или иных подобных событиях.

Очевидно, что рейтинги корпоративной социальной ответственности корреспондируются с перечисленными выше положениями. В этом случае состав и значения факторов оценки существенно расширяются после рассмотрения не только обязательств, но и активов, а также результатов деятельности банка (см. таблицу).

Рейтинги от «ru AAA» до «ru CCC» могут быть дополнены знаками плюс (+) или минус (−) для обозначения промежуточных рейтинговых показателей по отношению к основным категориям.

Сравнительная рейтинговая оценка КСО основана на результатах анализа количественных значений показателей, характеризующих деятельность банков в условиях рыночных отношений. Для её проведения необходимо следующее:

сбор и аналитическая обработка исходной информации за оцениваемый период;

обоснование системы показателей, используемых для рейтинговой оценки корпоративной социальной ответственности банка;

расчёт итогового показателя рейтинговой оценки;

классификация (ранжирование) банков по выбранному показателю.

Достоинства рассматриваемой методики рейтинговой оценки КСО банка:

методика базируется на комплексном подходе к оценке такой сложной категории, как корпоративная социальная ответственность банка;

рейтинговая оценка осуществляется на основе данных публичной отчётности банка. Это делает оценку объективной, позволяет контролировать изменения в положении или состоянии банка всем участникам экономического процесса, оценить результативность и объективность самой методики. Для этого используются важнейшие показатели результатов деятельности банка, применяемые на практике:

сравнительная рейтинговая оценка, учитывающая реальные достижения аналогичных банков или конкурентов;

математический метод для получения итоговой рейтинговой оценки, реализующий возможность комплексной оценки направленной деятельности банков.

В общем виде итоговая рейтинговая оценка КСО заключается в следующем:

1. Исходные данные представляются в виде матрицы (a_{ij}), где по строкам записаны номера показателей ($i = 1, 2, 3, ..., m$), а по столбцам — номера банков ($j = 1, 2, 3, ..., n$).

2. По каждому показателю обосновывается лучшее значение (a_i), которое заносится в столбец условного эталонного банка ($m + 1$).

3. Исходные показатели матрицы (a_i) нормализуются в отношении соответствующего показателя эталонного банка:

$$x_{ij} = a_{ij}/a_i,$$

где $x_{1j}, x_{2j}, ..., x_{nj}$ — нормализованные показатели j-го банка.

4. Для каждого анализируемого банка значение его рейтинговой оценки определяют по формуле:

$$P_j = \sqrt{(1 - x_{1j})^2 + (1 - x_{2j})^2 + \ldots + (1 - x_{nj})^n}.$$

При расчёте рейтинговой оценки можно учесть значимость показателей, фиксируя их «веса» по определённому критерию.

5. Банки ранжируются в порядке убывания их рейтинговой оценки. Для применения данного подхода на практике ограничений по количеству сравниваемых показателей и банков не имеется.

Указанный метод получения рейтинговой оценки КСО банка может применяться для сравнения банков на дату составления баланса или в динамике и делает количественно измеримой оценку деловых качеств партнёра, производимую по результатам его текущей и предыдущей деятельности.

Оценка КСО банков — это мощное, но пока недооценённое средство решения многочисленных финансовых и управленческих задач. Оценка факторов влияния требует дополнительных расходов, но позволяет сформировать обоснованную перспективную политику работы банка и его отношений в деловом сообществе.

Библиографические ссылки

1. **Тульчинский Г.Л.** Корпоративная социальная ответственность: технологии и оценка эффективности. М.: Издательство Юрайт, 2014. 338 с.

2. **Коротков Э.М., Александрова О.Н., Антонов С.А. и др.** Корпоративная социальная ответственность [под ред. Э.М. Короткова]. М.: Издательство «Юрайт», 2013. 445 с.

3. **Письмо ЦБРФ** от 30 июня 2005 г. № 92-Т «Об организации управления правовым риском и риском потери деловой репутации в кредитных организациях и банковских группах».

4. www.alfabank.ru

5. www.standardandpoors.ru